

## **Kaupunkien kolmiulotteiset mallinnusmenetelmät**

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön laitos  
Insinööritieteiden korkeakoulu  
Aalto-yliopisto

Espoossa 16. toukokuuta 2017

Tekniikan kandidaatti Enni Airaksinen

Valvoja: Professori Henrik Haggrén  
Ohjaajat: Arkkitehti/DI Jarmo Suomisto ja DI Kari Kaisla

---

**Tekijä** Enni Airaksinen

---

**Työn nimi** Kaupunkien kolmiulotteiset mallinnusmenetelmät

---

**Koulutusohjelma** Geomatiikka

---

**Pääaine** Fotogrammetria ja kaukokartoitus

---

**Koodi** M3006

---

**Työn valvoja** Professori Henrik Haggrén

---

**Työn ohjaajat** Arkkitehti/DI Jarmo Suomisto ja DI Kari Kaisla

---

**Päivämäärä** 16.5.2017

---

**Sivumäärä** 97+2

---

**Kieli** suomi

---

## Tiivistelmä

Kaupungistuminen on vahva trendi nykymaailmassa. Kaupunkien jatkuva kasvu johtaa erilaisiin kaupungistumiskehityksen tarpeisiin ja haasteisiin, joihin tulee vastata yhä paremalla kaupunkisuunnittelulla, -ylläpidolla, -hallinnalla ja -kehityksellä. Kaksiulotteisen paikkatiedon käyttäminen kaupunkisuunnittelussa ja -kehityksessä ei tulevaisuudessa riitä, koska kaupungit ovat monimuotoisia ja kaupunkien kompleksisuus kasvaa entisestään. Kaupunkien kolmiulotteinen tarkastelu mahdollistaa innovatiivisen kaupunkisuunnittelun ja -kehityksen. Tulevaisuudessa uudenlaiset työ- ja toimintatavat tulevat olemaan avainasemassa kaupungistumiskehityksessä, koska informaatiossa tulee olemaan semantiikkaa.

Työssä kerrotaan, millä eri tavoilla kaupunkia pystytään mallintamaan kolmiulotteisesti ja mihin kaupunkimalleja käytetään. Työhön on dokumentoitu kahden todellisuudessa toteutetun kaupunkimallin tuotantoprojektit, jotka perustuvat työn tekijän kokemuksiin. Työssä kuvataan työvaiheita, joita tarvitaan kolmiulotteisen kaupunkimallin tuottamiseksi.

Kirjallisuustutkimuksessa havaittiin, että kolmiulotteisen kaupunkimallin toteuttamiseen on tarjolla manuaalisia, puoliautomaattisia ja automaattisia menetelmiä. Fotogrammetriset menetelmät ja laserkeilaustekniikka ovat pitkälle automatisoituja menetelmiä, joilla kolmiulotteinen kaupunkimalli pystytään tuottamaan kustannustehokkaasti. Toteuttamiskelpoisia kaupunkimalleja ovat kolmioverkkomallit, vääjätty pistepilvet ja semanttiset CityGML-kaupunkitietomallit. Kaupunkimalleilla on lukuisia erilaisia käyttötapoja. Kolmiulotteiset kaupunkitietomallit liittyvät laajempaan kokonaisuuteen osana muun muassa kaupunkikehitystä, digitalisaatiota, kaupungin digitaalista replikkaa ja älykästä kaupunkia.

Kaupunkimallien tuotantoprojekteista tehdyt havainnot paljastivat, että fotorealistinen kolmioverkkomalli on huomattavasti yksinkertaisempi ja suoraviivaisempi toteuttaa kuin semanttinen CityGML-kaupunkitietomalli. Semanttisen kaupunkitietomallin toteuttaminen vaatii laaja-alaista tietotaitoa kaupunkitietomallityöstä ja useiden kaupunkimallinnuksen osavaiheiden vaatimusten ymmärtämistä. Fotogrammetrinen kaupunkimallinnus soveltuu erityisesti kaupunkien nopeaan ja fotorealistiseen kolmiulotteiseen mallinnukseen.

---

**Avainsanat** 3D-kaupunkimalli, 3D-kaupunkitietomalli, CityGML, kolmioverkkomalli

---



|   |                             |                         |
|---|-----------------------------|-------------------------|
| <b>Author</b> Enni Airaksinen   |                             |                         |
| <b>Title of thesis</b> Three-dimensional city modelling methods   |                             |                         |
| <b>Degree programme</b> Degree Programme in Geomatics   |                             |                         |
| <b>Major</b> Photogrammetry and Remote Sensing  |                             | <b>Code</b> M3006       |
| <b>Thesis supervisor</b> Professor Henrik Haggrén   |                             |                         |
| <b>Thesis advisors</b> Architect/Master of Science (Tech.) Jarmo Suomisto and Master of Science (Tech.) Kari Kaisla |                             |                         |
| <b>Date</b> 16.5.2017   | <b>Number of pages</b> 97+2 | <b>Language</b> Finnish |

## **Abstract**

Urbanization is a strong trend in the modern world. The continuous growth of cities leads to different urban development needs and challenges which have to be met by improved city planning, maintenance, management and development. Use of two-dimensional geographic information in city planning and development will not be enough in the future as cities become diverse and city complexity increases. Being able to look at cities and information about them in three dimensions aim to enable innovative city planning and development. In the future, new working methods will play a key role in urban development because information has been enriched with semantics.

The thesis describes methods to model cities in three dimensions and looks where these models are needed. The thesis documents two 3D city modelling projects based on the writer's experiences. The thesis goes through the processes of 3D city modelling.

Through the literature review, it was found that cities can be modelled in three dimensions by manual, semi-automatic and automatic methods. Photogrammetric methods and laser scanning technology are highly automated methods that can be used to model a 3D city model almost automatically. Desirable 3D city models concern reality mesh models, coloured point clouds and semantic city information models. 3D city models have a wide variety of use cases. Three-dimensional city information models belong to a broader context of urban development and digitalisation, a case in point is digital twins and smart cities.

The two 3D city model production projects revealed that it is much simpler and straightforward to realize a photorealistic mesh model than a semantic city information model. Creating a city information model requires extensive know-how about the technique and the requirements of the production process. Photogrammetric city modelling can be used to create photorealistic 3D city models rapidly and effortlessly.

---

**Keywords** 3D city model, 3D city information model, CityGML, mesh model

---

## Alkusanat

*Toivon, että työlläni on merkitys mesh- ja tietomallien, rakennetun ympäristön sekä kaupunkisuunnittelun ja -kehityksen yhteisen ymmärryksen rakentamisessa.*

*Työni valvojana toimi professori Henrik Haggrén. Työtä ohjasivat hankkeen HELSINKI<sup>3D+</sup> projektipäälliköt Jarmo Suomisto ja Kari Kaisla. Haluan kiittää heitä oivallisista ohjeista ja fantastisista faktatiedoista. Olen heille kiitollinen mahdollisuudesta olla mukana tuottamassa uuden sukupolven 3D-kaupunkimalleja.*

*Haluan kiittää koko perhettä saadusta tuesta opintieillä. Tahdon myös erityisesti kiittää rakasta Anttia, joka kulki rinnallani tällä tutkimusmatkalla.*

Espoo 16.5.2017

Enni Airaksinen



# Sisällysluettelo

**Tiivistelmä**

**Abstract**

**Alkusanat**

**Sisällysluettelo**

**Lyhenteet**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Johdanto</b>                                     | <b>8</b>  |
| 1.1      | Työn motivaatio                                     | 8         |
| 1.2      | Kaupunkimallin merkitys                             | 9         |
| 1.2.1    | Sosiotekninen järjestelmä                           | 10        |
| 1.2.2    | Tietomallipohjainen työ                             | 12        |
| 1.2.3    | Älykaupunki   | 14        |
| 1.3      | Työn tarkoitus                                      | 16        |
| <b>2</b> | <b>Kaupunkimallinnusmenetelmät</b>                  | <b>17</b> |
| 2.1      | Fotogrammetrinen menetelmä                          | 23        |
| 2.1.1    | Eteenpäinleikkaus                                   | 24        |
| 2.1.2    | Kuvien yhteensovitus                                | 25        |
| 2.1.3    | Tiheä yhteensovitus                                 | 27        |
| 2.2      | Laserkeilauksen periaate                            | 27        |
| 2.2.1    | Laserkeilauspohjainen mallintaminen                 | 28        |
| 2.3      | Kaupunkitietomallintaminen                          | 33        |
| 2.3.1    | CityGML-tietomallista yleisesti                     | 33        |
| 2.3.2    | Tarkkuustasot                                       | 35        |
| 2.3.3    | Spatio-semanttinen koherenssi                       | 36        |
| 2.3.4    | Rakennus-moduuli                                    | 38        |
| 2.3.5    | Maanpinta-moduuli                                   | 40        |
| 2.3.6    | Kasvillisuus-moduuli                                | 42        |
| 2.4      | Rakennusten ja infrarakenteiden tietomallintaminen  | 43        |
| <b>3</b> | <b>Kaupunkimallinnusprojektien tausta</b>           | <b>44</b> |
| <b>4</b> | <b>Kolmioverkkomallin tuotantoprojekti</b>          | <b>47</b> |
| 4.1      | Valmistelevat työt                                  | 49        |
| 4.1.1    | Aluerajaus ja tiilitys                              | 50        |
| 4.1.2    | Tukipisteiden mitta                                 | 50        |
| 4.1.3    | Vesialueiden määrittäminen                          | 53        |
| 4.2      | Tuotannolliset toimet                               | 53        |
| 4.2.1    | Lähtötietoaineistojen käsittely                     | 55        |
| 4.2.2    | Automaattinen ilmakolmiointi                        | 55        |
| 4.2.3    | Mallin rekonstruktio                                | 59        |
| 4.3      | Havaintoja valmiista geometrisesta kaupunkimallista | 65        |
| 4.4      | Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin arviointi      | 69        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>5</b>   | <b>CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojekti .....</b>            | <b>71</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Aineiston keruu ja käsittely.....</b>                             | <b>72</b> |
| 5.1.1      | Ilmavalokuvat.....   | 73        |
| 5.1.2      | Pistepilvet .....  | 75        |
| 5.1.3      | Korkeusmallien tuotanto .....  | 75        |
| 5.1.4      | Ortokuvan tuotanto .....   | 76        |
| 5.1.5      | Rakennusten kivijalkavektorien käsittely .....                       | 76        |
| <b>5.2</b> | <b>CityGML-rakennusten tuotanto.....</b>                             | <b>77</b> |
| 5.2.1      | Semanttisen geometriamallin tuotanto .....                           | 78        |
| 5.2.2      | Automaattiteksturointi .....   | 81        |
| 5.2.3      | Rakennusten ominaisuustiedot .....                                   | 82        |
| <b>5.3</b> | <b>Maanpintamallin tuotanto.....</b>                                 | <b>83</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Havainnot valmiista semanttisesta kaupunkitietomallista .....</b> | <b>84</b> |
| <b>5.5</b> | <b>CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojektin arviointi .....</b> | <b>88</b> |
| <b>6</b>   | <b>Johtopäätökset .....</b>  | <b>89</b> |
| <b>7</b>   | <b>Yhteenveto.....</b>   | <b>92</b> |
|            | <b>Lähdeluettelo.....</b>  | <b>93</b> |
|            | <b>Liiteluettelo</b>   |           |

## Lyhenteet

|           |  |
|-----------|--|
| 3DCityDB  | 3D City Database                                       |
| ADE       | Application Domain Extension                           |
| ASPRS     | American Society for Photogrammetry and Remote Sensing |
| BIM       | Building Information Modelling                         |
| CAD       | Computer Aided Design                                  |
| CC BY 4.0 | Nimeä 4.0 Kansainvälinen                               |
| DEM       | Digital Elevation Model                                |
| DSM       | Digital Surface Model                                  |
| DTM       | Digital Terrain Model                                  |
| FOV       | Field of View  |
| GML3      | Geographical Markup Language versio 3.1.1              |
| GNSS      | Global Navigation Satellite System                     |
| GPS       | Global Positioning System                              |
| GSD       | Ground Sampling Distance                               |
| IFC       | Industry Foundation Classes                            |
| IMU       | Inertial Measurement Unit                              |
| InfraBIM  | Infra Built Environment Information Model              |
| INS       | Inertial Navigation System                             |
| LOD       | Level of Detail  |
| OGC       | Open Geospatial Consortium                             |
| SfM       | Structure from Motion                                  |
| SGM       | Semi-Global Matching                                   |
| SIG 3D    | Special Interest Group 3D                              |
| TIC       | Terrain Intersection Curve                             |
| TIN       | Triangulated Irregular Network                         |

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn motivaatio

Maailmanlaajuisesti väestömäärän ennustetaan jatkavan kasvuaan ja sen myötä kaupunkien väkiluku kohoaa. Väestö keskittyy yhä enemmän kaupunkiseuduille, mikä tarkoittaa kaupunkien jatkuvaa kasvua. Kaupunkien väestömäärä lisääntyy merkittävästi myös vilkkaan muuttoliikkeen myötä, mikä erityisesti kohdistuu vetovoimaisiin ja milleniaaleja houkutteleviin kaupunkeihin. Ennustetaan, että vuoteen 2050 mennessä kaksi kolmasosaa maailman väestöstä asuu kaupungeissa. Tällä hetkellä hieman yli puolet maailman väestöstä asuu kaupungeissa. (Loikkanen et al., 2016; United Nations, 2014.) Kaupungistuminen saa aikaan sen, että kaupungit kehittyvät, levittäytyvät, kohoavat ja tiivistyvät. Kasvavien kaupunkien hallittu kehittäminen onkin välttämätöntä tulevaisuuden kaupungistumiskehitykselle. Kaupungistuminen aiheuttaa myös liikennemuutosten ja haitallisten ympäristövaikutusten lisääntymistä. Kaupungistuminen tulisi tapahtua huomioiden niin ekologinen, sosiaalinen kuin taloudellinen kestävyys.

Kasvavien kaupunkien ylläpidon, suunnittelun ja kestävä kehityksen päätöksenteon tueksi tulee tarjota ajantasaista tietoa sekä kaupungeissa vallitsevista olosuhteista että tulevaisuuden näkymistä. Tulevaisuuden älykäs, kestävä ja elinvoimainen kaupunki koostuu fyysisestä järjestelmästä, jota tukee digitaalisten järjestelmien kokonaisuus ja joka huomioi erityisesti kaupungissa elävät ihmiset, yhteiskunnan sekä sosio-ekonomisen kokonaisuuden. Älykkäiden kaupunkien myötä kaupunkilaisten niin elämäntavat, työskentelymuodot, energiankulutus kuin myös kulkuneuvojen käyttö tulevat muuttumaan. Tulevaisuuden kaupungit suunnitellaan ja rakennetaan ihmisten elämänlaatuun vaikuttavia tekijöitä mittaamalla ja analysoimalla.

Kaupungeja mallintavat kolmiulotteiset mallit pystyvät tarjoamaan uusia näkökulmia sekä informaation uudenlaista hyödyntämistä kaupunkien parempaan kehittämiseen ja suunnitteluun (Biljecki et al., 2015; Leberl et al., 2012; Döllner et al., 2006). Kaupungit ovat monimuotoisia, minkä vuoksi kolmiulotteisen paikkatiedon laajentaminen kolmanteen ulottuvuuteen tuo uusia mahdollisuuksia kehittää kaupungeja ja parantaa kaupunkilaisten elämänlaatua.

Viime vuosien aikana ympäri maailmaa on kehitetty 3D-mallinnus- ja tietomallinnusteknologioissa useita innovaatioita, jotka ovat mahdollistaneet kaupunkien kolmiulotteisen mallinnuksen. Kolmiulotteinen kaupunkimalli voidaan tuottaa useilla erilaisilla teknologioilla, kuten laserkeilauksella, fotogrammetrisilla menetelmillä, tietokoneavusteisella 3D-mallinnuksella tai mobiilikartoituksella. Jatkuva teknologioiden kehitys mahdollistaa tehokkaiden kolmiulotteisten mallien tuottamisen kaupungeista. Nämä kaupunkimallit sisältävät informaatiota rakennuksista, kasvillisuudesta, liikennemerkeistä sekä maanpäällisistä ja maanalaisista johdoista (Leberl et al., 2012). Oikeassa mittakaavassa oleva malli kaupunkien ulko- sekä sisätiloista on alusta lukemattomille eri kehitys- ja sovellusideoille.

Kaupunkimalli on yleensä digitaalisessa muodossa oleva kolmiulotteinen malli kaupungista. Malli voi sisältää sekä kolmiulotteista geometriatietoa että semantiikkaa kaikista tai vain

osasta maanpäällisistä tai maanalaisista kohteista. Kaupunkimalleissa ovat useimmiten keskiössä rakennukset, koska niiden arvo muihin kohteisiin verrattuna on yleensä paljon suurempi. Erilaisia kolmiulotteisia kaupunkimalleja yhdistää niiden fotorealistinen esitystapa sekä pyrkimys mallintaa todellisuutta reaali maailmaa jäljitellen. Kaupunkimallien yksi keskeinen tavoite on esittää kaupunkien infrastruktuuri helposti ymmärrettävässä muodossa (Döllner et al., 2005).

Viime vuosikymmenien aikana kolmiulotteisia kaupunkimalleja on käytetty valtaosin suunnitelmien havainnollistamiseen ja erilaisiin visuaalisiin simulaatioihin, mutta nykyään kaupunkimallien mahdollisuuksia hyödynnetään kokonaisvaltaisemmin. Teknologioiden ja ohjelmistojen kehittyessä kaupunkimalleja on ryhdytty käyttämään monissa erilaisissa sovelluksissa niin suunnittelu- kuin analysointitehtävissä. Kolmiulotteisten virtuaalisten kaupunkimallien tutkiminen on ollut viime vuosina kasvussa ja sen tuloksena on syntynyt laaja joukko sovelluksia kaupunkielämiseen, rakennusten suunnitteluun, kiinteistöarviointiin, aurinkopaneelien sijoittamiseen, ympäristöanalyysihin, kaupunkilaisia osallistavaan kaupunkisuunnitteluun ja lukuisiin muihin käyttökohteisiin. (Helsingin kaupunki, 2016; Biljecki et al., 2015; Leberl et al., 2012; Döllner et al., 2006.)

Semanttiset kaupunkitietomallit ovat tietomalleja, joita voidaan rikastuttaa lisäämällä ominaisuustietoja lähes rajattomasti. Kaupunkimallissa oleva semantiikka soveltuu niin analysointitehtäviin, simulaatioihin, temaattisiin kyselyihin kuin spatiaaliseen tiedonlouhintaan. Geometrinen kaupunkimalli sen sijaan käsittää pelkästään geometria- ja tekstuuritietoa. Geometrinen ja graafinen esitystapa on olennaista geometriselle kaupunkimallille, kun taas semanttinen kaupunkitietomalli sisältää myös semantiikkaa ja ominaisuustietoa, minkä vuoksi se on sovellettavissa kehittyneisiin kaupunkianalyysihin ja -simulaatioihin (Helsingin kaupunki, 2016).

## **1.2 Kaupunkimallin merkitys**

Kaupunkimalli tulee olemaan tärkeässä roolissa digitaalisten toimintojen yleistymisessä ja etenkin asioiden esittämisessä digitaalisella alustalla. Gartner (2016) mainitsee, että 3–5 vuoden kuluttua miljardit asiat tullaan esittämään digitaalisissa kaksosissa, jotka tarkoittavat digitaalisia ja dynaamisia malleja mistä tahansa fyysisestä kohteesta tai järjestelmästä. Semanttinen kaupunkitietomalli vastaa fyysisen kaupungin digitaalista kaksosta, jota pystytään käyttämään reaali maailman sekä nykyhetken olosuhteiden että tulevaisuuden muutosten analysointeihin ja simulaatioihin.

Kaupunkimalleilla on moninaisia käyttötarkoituksia, esimerkiksi analyysit, simulaatiot, kyselyt, suunnittelu, tuote- ja palveluinnovaatiokehitys. Kaupunkimalli innovaatioalustana tarjoaa mahdollisuuden täysin uusiin toimintatapoihin ja tuotekehitykseen niin kaupungin sisäisessä tuotannossa kuin yritysten liiketoiminnan kehityksessä. Avoimena datana jaettava kaupunkimalli voi tuottaa ennennäkemättömiä tuote- tai palveluinnovaatioita. Kaupunkimallin avulla tehdyt analyysit voivat toimia päätöksenteon tukena muun muassa kaupungin sisäisessä palvelutuotannossa. (Helsingin kaupunki, 2016.) Yksityiset toimijat ja yritykset voisivat hyötyä 3D-kaupunkimallinnuksesta ja tarjota erilaisia räätälöityjä sovelluksia kaupunkimallin hyödyntämiseen (Biljecki et al., 2015).

Biljecki et al. (2015) ovat tuottaneet perusteellisen kirjallisuustutkimuksen 3D-kaupunkimallien käyttötapauksista ja luoneet kattavan listan käytetyistä sovelluksista. Tutkijat luokittelivat kaikki mahdolliset käyttötapaukset 29 eri kategoriaan, joita ovat muun muassa aurion säteilyn ja energiantarpeen arviointi, näkyvyys-, melu- ja varjostusanalyysit, kaupunkisuunnittelu, virtaus- ja tulvalaskenta sekä arkeologia. Tutkimuksessa mainittiin myös, että 3D-kaupunkimalleja hyödynnetään tällä hetkellä kymmenillä eri sovellusalueilla ja toimialoilla.

Monipuoliset kaupunkimallit ovat käyttökelpoisia useilla eri toimialoilla ja malleja voidaan soveltaa niin elinkeinoelämän, matkailun, navigaation, pelastustoimen, televerkkojen rakentamisen, kiinteistöhallinnan, aluesuunnittelun, vaihtoehtoisten energianlähteiden käytön mahdollisuuksien arvioinnin, kasvihuonekaasupäästöistä kertovien analyysien, liikenteen ympäristövaikutuksista laskevien analyysien, tulvakartoituksen, melulaskennan, turva-alan ja sen koulutuksen kuin energian käytön parissa (Helsingin kaupunki, 2016; Biljecki et al., 2015).

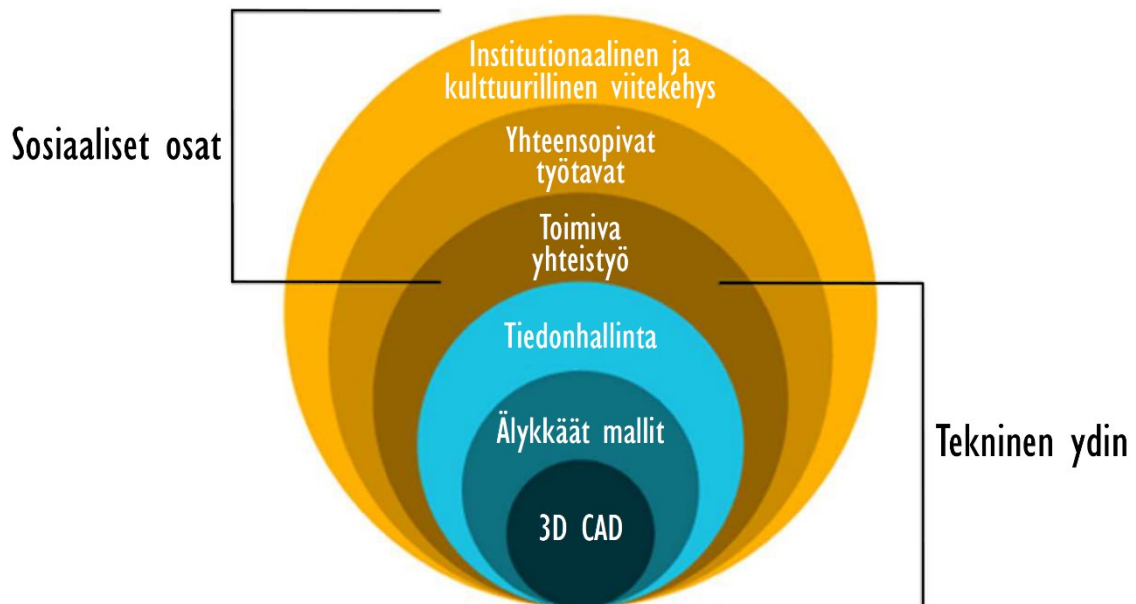
Biljecki et al. (2015) mukaan 3D-kaupunkimallintamisen lähtökohtana voisi olla kaupunkimallin erilaisten käyttöskenaarioiden määrittely, jolloin lähtötietoaineistoille pystyttäisiin asettamaan vaatimukset kaupunkimallin käyttökohteiden perusteella. Toisaalta kunnilta löytyvät jo kaksiulotteiset paikkatietojärjestelmät ja -aineistot, jotka toimivat hyvänä lähtökohdaksi kaupunkimallien luomiseksi (Leberl et al., 2012; Helsingin kaupunki, 2016). Lähtötietoaineistot, käyttöskenaariot, 3D-mallinnus ja tiedonhallinta ovat vain yksi osa kokonaisuutta, sillä kolmiulotteinen kaupunkimalli on monimuotoinen kokonaisuus, jonka toimivuus vaatii sekä abstraktien käsitteiden että teknisten toteutusten ymmärtämistä yhtenä eheänä järjestelmänä.

### **1.2.1 Sosiotekninen järjestelmä**

Yhteiskunta on järjestelmä, joka toimii sovittujen sääntöjen mukaan. Yhteiskunnalla on useita kompleksisia haasteita ja tarpeita, jotka ovat esimerkiksi ekologisia, sosiaalisia, teknisiä, kulttuurisia, taloudellisia sekä poliittisia. Kaupungit ovat kompleksisia sosioteknisiä järjestelmiä, jotka vaikuttavat yhteiskuntaan yhä laajemmin ja syvemmin. Sosioteknisen järjestelmän malli pyrkii ottamaan huomioon toisiinsa vaikuttavat useat osatekijät, joiden vaatimukset huomioimalla voidaan vastata yhteiskunnan ja kaupunkien haasteisiin. Kaupunkien kompleksisuus kasvaa entisestään. Näiden kompleksisten eri osien tunnistaminen on edellytyksenä kokonaisvaltaiselle rakennetun ympäristön suunnittelulle, ylläpidolle ja kehitykselle. (Valovirta et al., 2011.)

Kompleksisuus voidaan jakaa sosiaaliseen ja tekniseen ulottuvuuteen. Kuva 1 esittää rakennusten tietomallinnuksen (BIM, Building Information Modelling) sosioteknisenä järjestelmänä teknisten ja sosiaalisten osien yhdistelmänä. Edellä mainittua järjestelmää voidaan verrata yhteiskuntaan ja kaupunkeihin, jotka koostuvat monista vuorovaikutteisista osista, jotka on jaettu sosiaaliseen ja tekniseen ulottuvuuteen. Sosiotekninen järjestelmä yhdistää sekä ihmisten että teknologian vaatimukset. Esimerkkinä sosioteknisestä järjestelmästä voidaan mainita internet, joka on yksi tekniset ja sosiaaliset näkökohdat täyttävä sosiotekninen järjestelmä. Internet-yhteys ei käsitä pelkästään kaapeleita, päätelaitteita tai muita internet-yhteyteen liittyviä teknologioita, vaan sisältää myös tiettyä käyttäytymistä,

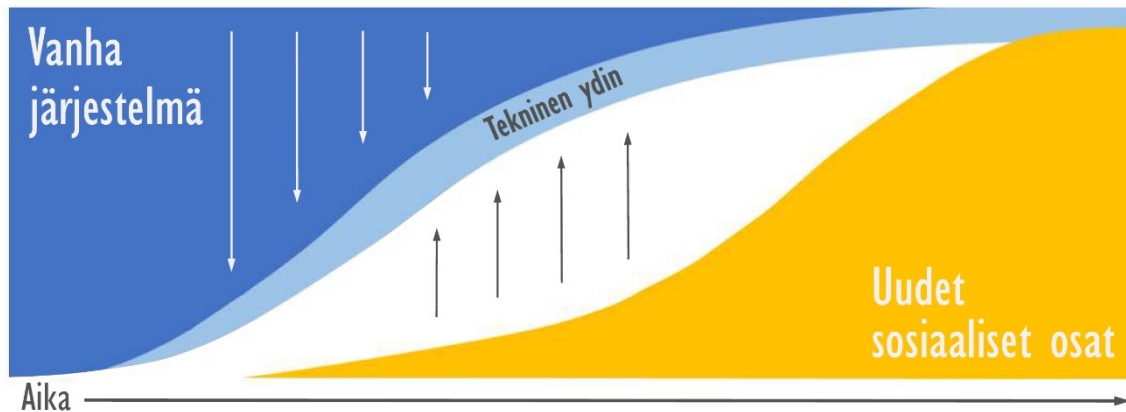
sosiaalisia normeja, tietämyystyyppejä suhteita ja kulttuurisia piirteitä. (WSP, 2013; Kairos Future et al., 2011; Suomisto, 2016.)



**Kuva 1** Sosioteknisen järjestelmän osat. (WSP, 2013, mukaillen)

Sosiotekninen järjestelmä vaatii toimiakseen ihmisen luoman keinotekoisien teknisen ytimen, joka sisältää ratkaisun olemassa olevaan ongelmaan. Sosiaaliset toiminnot, joita ovat teoreettiset viitekehykset institutionaalisista ja kulttuurisista lähteistä, työmenetelmät ja muu sosiaalinen vuorovaikutus, ovat osaltaan vaikuttaneet tämän tietyn teknisen ratkaisun syntymiseen. Teknisen ytimen täytyy olla kunnossa, jotta voidaan siirtyä ytimestä ulospäin ja muovata uusia sosiaalisia toimintatapoja sekä laajentaa sosiaalisen toimintakentän mahdollisuuksia. (WSP, 2013; Kairos Future et al., 2011; Suomisto, 2016.)

Vanhan järjestelmän joko korvaaminen kokonaan uudella järjestelmällä tai integroiminen osaksi uutta järjestelmää voi olla haastavaa. Uusi järjestelmä vaatii käytäntöjen ja toimintojen oppimista, mikä voi luoda käyttäjien ja järjestelmien välille ongelmia esimerkiksi liian vähäisen tietotaidon tai koulutuksen puutteen vuoksi. Kuvassa 2 esitetään vanhan järjestelmän ja uusien sosiaalisten toimintojen välinen kuilu, joka pyritään parsimaan yhteen uusilla teknisillä ratkaisulla. Uusilla teknisillä ratkaisulla pyritään siis vastaamaan yhteiskunnan muutoksiin. Kuva 2 esittää rakennusten tietomallinnuksen integroitumista ajan myötä osaksi yhteiskunnan toimintoja, mutta rakennusten tietomallinnuksen paikalla voidaan yhtä hyvin nähdä kaupunkien tai minkä tahansa kohteen tietomallinnus. Vanhan järjestelmän oletetaan olevan perinteinen kolmiulotteinen tietokoneavusteinen mallinnus, jonka tietomallinnus syrjäyttäisi, mikä voi käytännössä tuottaa haasteita ja voi luoda kuvassa näkyvää kuilua järjestelmien välille. (Kairos Future et al., 2011; Suomisto, 2016.)



**Kuva 2** Rakennusten ja kaupunkien suunnittelua helpottava tietomallinnus integroituu ajan myötä osaksi yhteiskunnan toimintoja. (Kairos Future et al., 2011, mukaillen)

Kolmiulotteinen kaupunkitietomalli voidaan nähdä sosioteknisenä järjestelmänä, jonka tekninen ydin koostuu 3D-mallinnuksesta ja tiedonhallinnasta. Teknisen alustan täytyy olla toimintakunnossa ennen kuin malli voidaan ylipäättään ottaa käyttöön ja integroida osaksi yhteiskunnan toimintoja. Teknisellä ytimellä voi olla monia vaatimuksia ja kriteerejä, esimerkiksi tietotaito, aikataulu, budjetti, tarkkuus, laajuus ja ohjelmistot. Toimivan järjestelmän tekninen ydin muovautuu yhdessä sosiaalisten toimintojen kautta. Kolmiulotteisen kaupunkitietomallinnuksen täytyy myös toteutua yhtenäisen sosioteknisen järjestelmän ymmärryksen kautta. Toimiva sosiotekninen järjestelmä on pitkäaikaisen kehitystyön tulos, joka on syntynyt sosiaalisen ja teknisen osan toisiaan muovaavasta vaikutuksesta.

Kaupunkitietomallin avulla voidaan kehittää yhteiskuntaa ja sen toimintoja entistä paremmaksi. Tietomallia voi kuka tahansa hyödyntää ilman, että hallitsee tai ymmärtää kokonaisvaltaisesti sosioteknistä järjestelmää. Mallin käyttöön riittää joko sosiaalisen tai teknisen järjestelmän tietyn osan ymmärtäminen. Kuitenkaan koulutuksen tarvetta uusien työkalujen ja -menetelmien pariin ei pidä aliarvioida –vaan mitä paremmin uudet työtavat hallitaan, sitä sujuvammin voidaan vastata yhteiskunnan asettamiin haasteisiin ja mahdollisesti myös kehittää kaupunkimallia paremmaksi.

### 1.2.2 Tietomallipohjainen työ

Suomessa kuin muuallakin Euroopassa yhteiskunta vastaa maankäytöstä ja sen perusrakenteen sekä toteuttamisesta että ylläpidosta. Yhdyskuntarakenteen suunnittelu sisältää muun muassa rakennusten, katujen, puistojen, muiden yleisten alueiden ja yhdyskuntateknisten verkostojen tehokasta ja taloudellista rakentamista. (Loikkanen et al., 2016.) Kaupungin tietomallintaminen kolmessa ulottuvuudessa on yhä tärkeämpää kaupunkialueen kasvaessa ja siten yhdyskuntarakentamisen kehitystyössä.

Kolmiulotteiset kaupunkimallit soveltuvat hyvin sekä yleispiirteiseen että yksityiskohtaiseen yhdyskuntarakentamisen suunnitteluun. Kaupunkimallilla voidaan suorittaa monenlaisia kaupunkianalyysseja ja -simulaatioita, jolloin esimerkiksi päätöksenteko voi perustua kol-

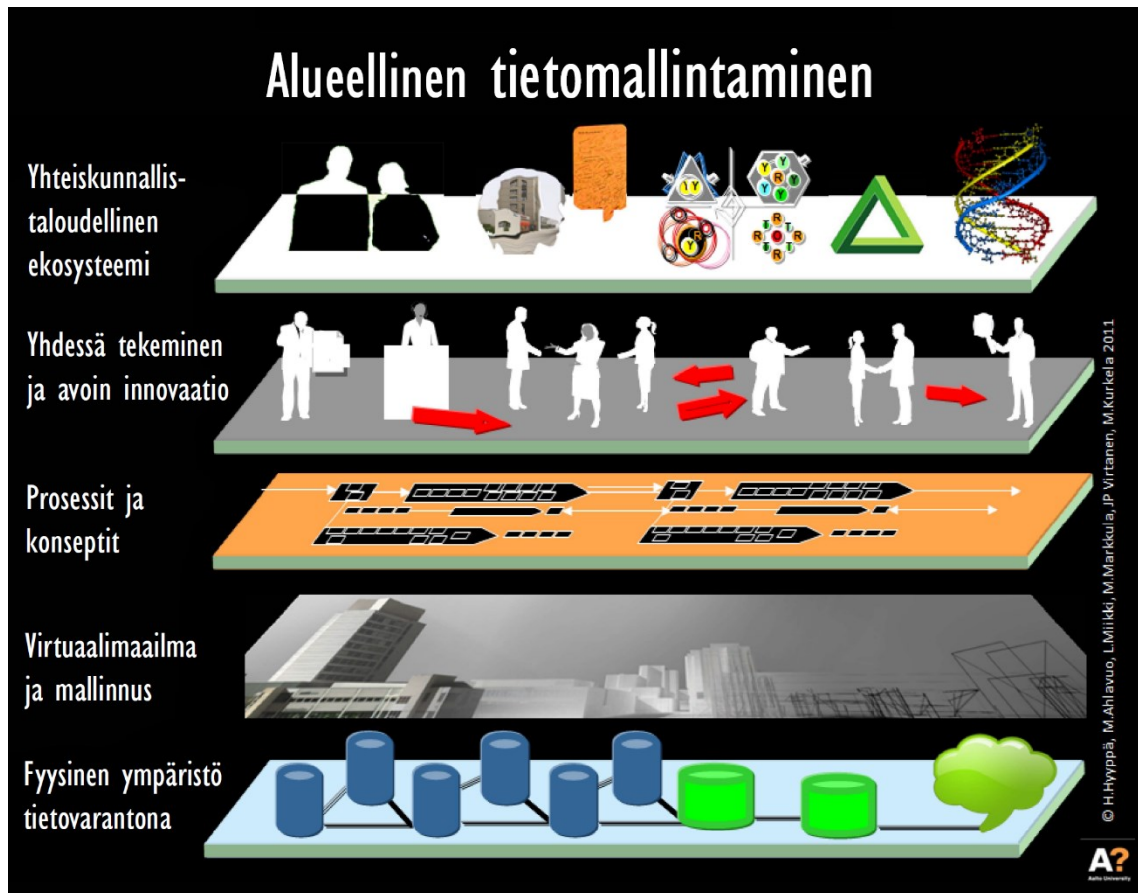


miulotteiseen malliin sekä siihen pohjautuviin analyysituloksiin ja faktatietoihin. Kolmiulotteiset kaupunkimallit tarjoavat käyttökelpoisen alustan niin kaupunkisuunnittelulle kuin -kehittämiselle. (Helsingin Kaupunki, 2016.)

Kolmiulotteiset kaupunkimallit voivat tarjota esimerkiksi yhdyskuntarakentamisen suunnittelutyöhön nykyisiä työmenetelmiä tehokkaammat työkalut ja alustat. Kaupunkimallit voivat vaikuttaa suunnittelutyöhön kehittämällä nykyisiä prosesseja sujuvammiksi. Kaupunkimallien käyttö tarjoaa informaatiolle paremman saatavuuden, koska silloin yhdelle alustalle on kerätty kaikki informaatio kaupungista. Kaupunkimallien käyttö vähentää myös ihmisten tekemiä virheitä ja nopeuttaa toistuvien työtehtävien suorittamista. Työn tuottavuus nousee laadun parantuessa, kun virheet, korjaukset ja muut tarpeettomat työvaiheet vähenevät. Tietojen yhdistämisessä on kaupunkimallien ja kolmiulotteisen tiedon voima.

Siinä missä rakennusten suunnittelu on tietomallipohjaista työtä, on sitä myös kaupunkien kehittäminen ja suunnitteleminen. Kairos Future et al. (2011) mainitsevat, että rakennusten tietomallinnus toteutuu parhaalla mahdollisella tavalla vain, jos sekä ohjelmistot että käyttäjät toimivat hyvin yhteen. Tietomallipohjainen työ perustuu pitkälti digitaalisilla alustoilla ja tuotteilla suoritettavaan työhön, minkä hallitseminen on kriittistä työstä suoriutumiseksi. Tietomallin tehokas käyttö on joka tapauksessa riippuvainen sosiaalisesta ympäristöstä, jossa malli ja teknologia otetaan käyttöön. Tietomallipohjainen työ ei ole vielä arkipäivää, minkä vuoksi tietomalleilla työskentely voi tarvita aluksi muutosta niin asenteissa, työskentelytavoissa kuin rutiineissa. Tietomallipohjaiseen työhön siirryttäessä tulee työtapoja mahdollisesti ohjeistaa ja opettaa, kunnes muutosten ja kokeilujen kautta saavutetaan uusia innovatiivisia toiminta- ja työtapoja.

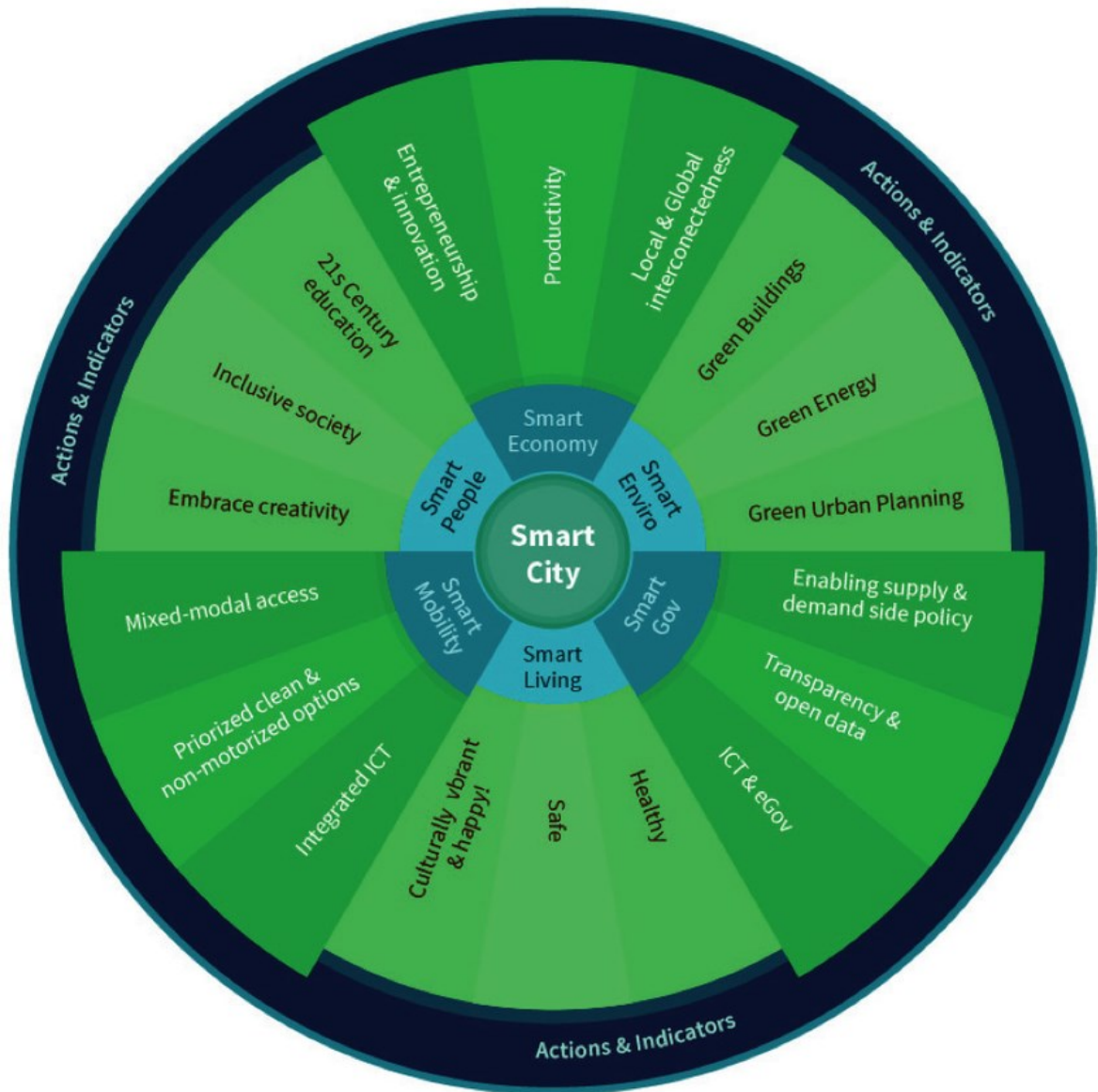
Kaupunkien tietomallintaminen yhdistää sosiaalisen, fyysisen ja virtuaalisen maailman, jonka eri toiminta-alat on havainnollistettu kuvassa 3. Kaupunkitietomallista löytyy digitaalisessa muodossa muun muassa yhteiskunnan prosesseja ja investointeja sekä työkaluja helpottamaan ihmisten arkielämää ja työssäkäyntiä. Digitaalinen käyttöliittymä kaupunkiin mahdollistaa älykkäiden kaupunkien rakentamisen ja kehittämisen. (Virtanen et al., 2014.)



**Kuva 3** Tietomallintaminen käsittää yhteiskunnan eri toiminta-alueita yhdessä konkreettisen mallin ja konseptin kanssa. (Virtanen et al., 2014, mukailen)

### 1.2.3 Älykaupunki

Älykkäät kaupungit ovat uusimpia konsepteja innovatiivisessa kaupunkikehittämisessä. Älykaupungit voivat tarkoittaa muun muassa älykästä asumista, älyliikennettä, älykkäitä tieto- ja energiaverkkoja, mitä havainnollistetaan kuvalla 4. Kuvassa esitetään keskiössä älykaupunki, joka koostuu älykaupungin eri toiminta-alojen älykkäistä toiminnoista. Älykkäät kaupungit sisältävät lukuisia kaupunkiin asennettuja mittareita ja sensoreita, joiden mittaus- ja analyysitulokset auttavat kaupunkia sopeutumaan muuttuviin olosuhteisiin. Älykkäät kaupungit on älykkäästi rakennettu, mutta pystyvät myös analysoimaan omaa tilaansa ja kykenevät toimimaan yllättävienkin tarpeiden ja muutosten mukaan. Älykaupungin käsitteestä on haastavaa antaa yksiselitteistä määritelmää, sillä se kattaa valtavasti erilaisia mahdollisuuksia ja keinoja kehittää kaupunkia yhä parempaan suuntaan niin ekologisesti, taloudellisesti kuin sosiaalisesti. (CEN GENELEC, 2015.)



**Kuva 4** Älykaupungin älykkäät sisällöt ja toiminnot. (Cohen, 2015)

Älykaupunkia ei pystytä tuottamaan ilman sopivia puitteita, jotka mahdollistavat kaupungissa olevien komponenttien paikannuksen eli tiedon sijainnista. Paikkatieto on merkittävä älykaupungin mahdollistava tekijä. Paikkatiedon tuottamisesta ja hyödyntämisestä puhuttaessa edellytetään ennen kaikkea yhteentoimivuuden takaamia kansainvälisiä standardeja, kuten kolmiulotteisen kaupunkitietomallinnuksen CityGML-standardia. CityGML-kaupunkitietomalleja voidaan käyttää kaupungista kerättävien tietojen kokoamiseen, linkittämiseen ja mallin ylläpitoon. CityGML-mallit mahdollistavat spatiaalisia kyselyitä olennaisen informaation löytämiseksi. Lisäksi tietomallin sisältö luo perustan tulevaisuuden sovelluksille, jotka voivat tuottaa erittäin monipuolista tietoa, jota alueella vieraileva tai asuva tarvitsee. (OGC, 2015.)

Älykaupungissa on mahdollista useiden fyysisten ominaisuuksien ja havaintojen reaaliaikainen seuraaminen, mikä tekee mahdolliseksi esimerkiksi päästöjen, ilmanlaadun, melutason ja auringon säteilyn määrän reaaliaikaisen tarkkailun. Älykkäät ratkaisut liikkumiseen, työskentelyyn ja asumiseen ovat tapoja lisätä ekologista kestävyyttä. Älykaupungin tarjoama toimintaympäristö tehostaa vähäistenkin resurssien käyttöä ja tuo sitä kautta sekä energian että materiaalien suoraa säästöä yhteiskunnalle. (CEN GENELEC, 2015.)

Kaupungista kerätyt havaintoaineistot ja mittaustulokset tulisi saattaa päätöksentekijöiden tietoon, jolloin kaupungin kehittämisen ohjaamiseen saataisiin ajan tasalla olevia faktoja. Älykaupungin myötä julkiset toimijat kykenevät yhä paremmin arvioimaan taloudellisia vaikutuksia, joita syntyy uusien tai yhä tehokkaampien palvelujen tarjonnasta. Tulevaisuudessa julkisen sektorin ylläpitämät palvelut ja käytettävissä olevat resurssit ohjataan yhä paremmin ja nopeammin suoraan sinne, missä niitä todella tarvitaan. Siinä missä älykaupungista mahdollisesti hyötyy julkinen sektori, pystyvät myös yksityiset toimijat kehittämään uusia liiketoimintamalleja ja tuottamaan älykaupunkiin integroituja innovatiivisia palveluita (CEN GENELEC, 2015). Älykkäät kaupungit tarjoavat merkittävän liiketoimintapotentiaalin.

### **1.3 Työn tarkoitus**

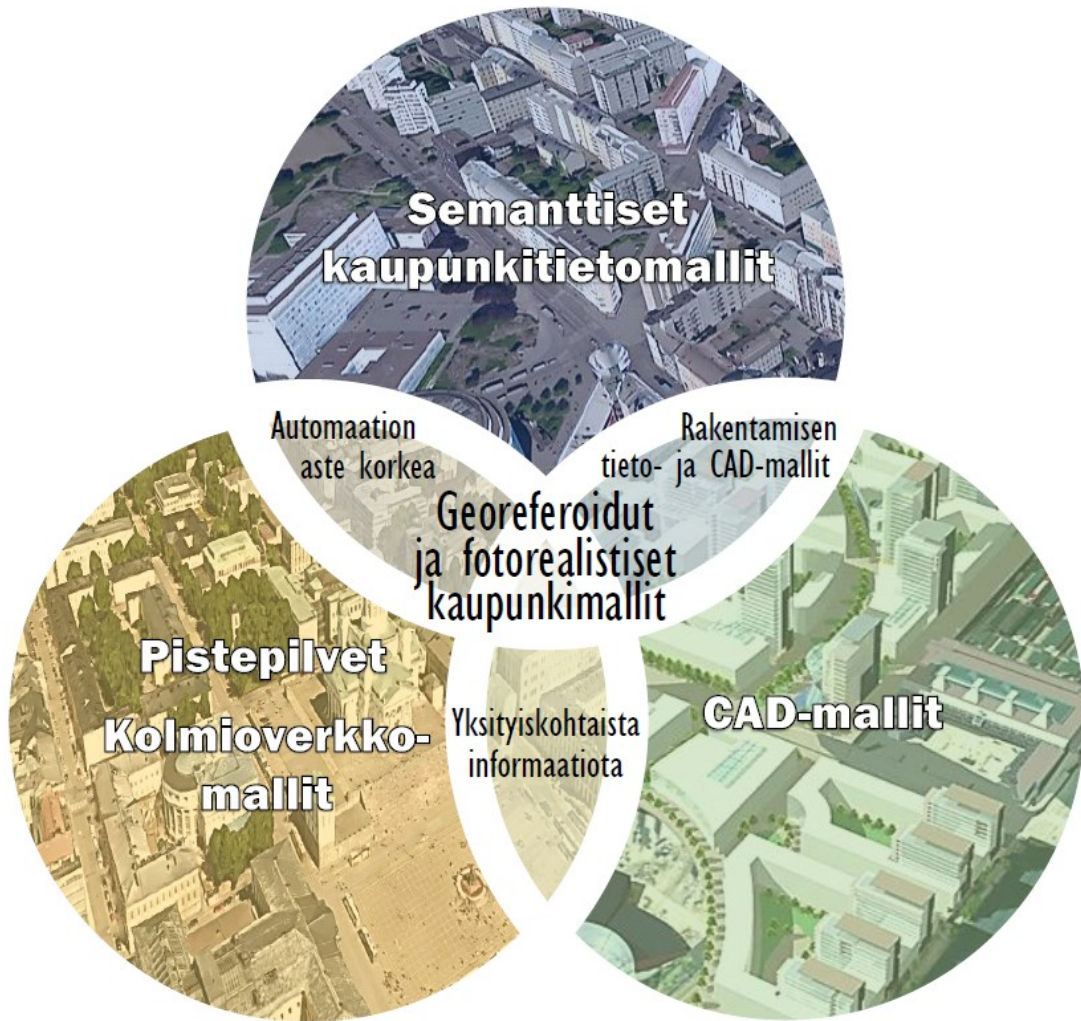
Tämän työn tavoitteena on selvittää, millä eri tavoilla kaupunkia pystytään mallintamaan kolmiulotteisesti. Työssä kerrotaan, minkälaisia erilaisia kaupunkimalleja on olemassa, millaisista asioista kaupunkien kolmiulotteinen mallinnus koostuu ja esitellään teoria kaupunkimallinnuksen taustalla. Kolmiulotteisia kaupunkimalleja tuotetaan erilaisilla menetelmillä, joihin paneudutaan tässä työssä kirjallisuustutkimuksen kautta. Työ dokumentoi kahden todellisuudessa toteutetun kaupunkimallin tuotantoprojektit, joissa tämän työn tekijä oli mukana. Työssä kuvataan työvaiheita, joita tarvitaan kolmiulotteisen kaupunkimallin tuottamiseksi, ja dokumentoidaan projekteissa opitut asiat. Ensiksi esitellään fotorealistisen kolmioverkkomallin tuottamiseen liittyvä prosessi ja toiseksi käydään läpi CityGML-muotoisen semanttisen kaupunkitietomallin tuotantoprojekti. Tuotantoprojektien toteutukseen liittyvän prosessin arvioinnin kautta on tarkoituksena löytää suositeltava kaupunkimallivaihtoehto kaupungin ensimmäiseksi kaupunkimalliksi.

## 2 Kaupunkimallinnusmenetelmät

Kolmiulotteinen kaupunkimalli tuotetaan tyypillisesti monenlaisten teknologioiden ja menetelmien kombinaatioilla. Kaupungin kolmiulotteinen mallintaminen tai tietomallintaminen voi perustua useisiin teknologioihin, joita ovat kaukokartoitus, ilmakuvauus, kuvien yhteensovitus, laserkeilaus, mobiilikeilaus, pistepilvien käsittely ja luokittelu, satelliittipaikannus, tietojenkäsittely, konenäkö ja niin edelleen. Useilta kaupungeilta ja kunnilta löytyvät jo kaksiulotteiset paikkatietojärjestelmät ja paikkatietoaineistot, jotka tarjoavat hyvän lähtökohdan kaupunkimallien tuottamiseksi (Helsingin kaupunki, 2016; Leberl et al., 2012). Kaupunkimallin tuotantomenetelmän ja lähestymistavan valinta riippuu joka tapauksessa lopputuotteelle asetetuista kriteereistä eli minkälaista kaupunkimallia ollaan rakentamassa (Döllner et al., 2005).

Kolmiulotteista kaupunkimallia toteutettaessa tulisi ensiksi analysoida, mikä on mallin tärkein käyttötarkoitus ja millä tarkkuustasolla tietoja halutaan mallintaa. Toiseksi tulisi selvittää mallinnettavan kaupungin tai kohdealueen pinta-ala ja rakenne, koska ne osaltaan vaikuttavat hankkeen kustannuksiin. Mallinnettavan kohteen rakenteella tarkoitetaan rakennetun ympäristön esimerkiksi rakennusten ja rakennelmien muotojen tai esiintyvyyden tarkastelemista suhteessa luonnonmukaiseen ympäristöön. Mallinnettavan kohdealueen ollessa suurin piirtein selvillä, tulisi läpikäydä sopivia menetelmiä, ohjelmistoja tai ulkopuolisia tuottajia kaupunkimallinnustyöhön hankkeen budjetin puitteissa. (Singh et al., 2014.)

Kaupunkimallin perusideana on esittää kaupunki digitaalisessa muodossa ja mahdollisimman fotorealistisen näköisenä, mutta yhtä tärkeää on kaupunkimallista löytyvien kohteiden tarkka mittaus. Kaupunkimalli tulee olla georeferoitu, joka tarkoittaa mallin sijaitsemista tunnetussa koordinaatistossa yhdessä muiden jo olemassa olevien kartta- ja paikkatietoaineistojen kanssa. Georeferoidusta kaupunkimallista pystytään mittaamaan minkä tahansa mallilla näkyvän kohteen koordinaatit ja selvittämään esimerkiksi kohteiden välisiä etäisyyksiä oikeassa mittakaavassa. Kuvan 5 kaupunkimalleista kaupunkitietomallit, kolmioverkkomallit ja värjätyt pistepilvet mallinnetaan yleensä suoraan tunnettuun koordinaatistoon, kun taas esimerkiksi CAD-mallit mallinnetaan usein aluksi paikalliseen koordinaatistoon, minkä jälkeen ne voidaan sijoittaa haluttuun kohdekoordinaatistoon.



**Kuva 5** Kolme eri kategorialla kolmiulotteisten kaupunkimallien luokitteluun.

Kolmiulotteiset kaupunkimallit voidaan luokitella kolmeen eri kategoriaan kuvan 5 mukaisesti. Ensinnäkin 3D-kaupunkimallit voidaan jakaa semanttisiin kaupunkitietomalleihin ja geometrisiin kaupunkimalleihin. Geometriamallit eroavat tietomalleista siinä määrin, että ne eivät ole semanttisia. Geometriset kaupunkimallit koostuvat pelkästään geometrisista muodoista ja mahdollisesta tekstuurista. Geometrisen mallin päätarkoituksena on esittää fotorealistista mallia, ja geometriset primitiivit sekä niiden yhdistelmät pyrkivät olemaan mahdollisimman realistisia. Toiseksi geometriamallit voidaan jakaa vielä kahteen eri kategoriaan automaatioasteen perusteella. Lähes automaattisia malleja ovat pistepilvet ja kolmioverkko-mallit, ja lähes aina runsaasti manuaalista työtä vaativia malleja ovat perinteiset tietokoneavusteiset mallit.

Kaupunkimalli, joka koostuu pistepilvestä, tarkoittaa esimerkiksi valokuvilla värjättyä laserpisteaineistoa, joka voi olla hyvinkin yksityiskohtainen riippuen siitä, kuinka läheltä kohteet on keilattu ja kuvattu. Valokuvilla värjätty pistepilvi on hyvä esimerkki lähes automaattisesti



luodusta kaupunkimallista. Valokuvaus- ja laserkeilausprosessit ovat pitkälle automatisoituja. Molempien prosessien tulosaaineistot yhdistämällä saadaan värikäs ja pistemäinen aineisto, joka mallintaa kaupunkia sekä kolmiulotteisesti että fotorealistisesti.

Tyypillisesti tietokoneavusteisessa suunnittelussa (CAD, Computer Aided Design) mallinnustyö toteutetaan manuaalisesti, mikä vaatii runsaasti työvoimaa ja on kustannustehotonta (Liang et al., 2016; Helsingin kaupunki, 2016). Manuaalisen mallinnuksen toteutukseen vaikuttaa ratkaisevasti mallintavan henkilökunnan tekninen osaaminen. Lisäksi manuaalisen mallinnuksen haasteita ovat muun muassa sen kalleus, hitaus ja lopputuloksen laadunarvioinnin vaikeus. (Liping et al., 2015.) Perinteinen manuaalinen kolmiulotteinen CAD-mallinnus tai muu manuaalinen 3D-kaupunkimallinnus ei enää nykypäivänä ole mielekästä, koska on olemassa automaattisia ja puoliautomaattisia 3D-mallinnusratkaisuja.

Rakennusten ja infrarakenteiden tietomallinnus kuvaa rakennettavien kohteiden kaikki rakennusprosessin aikaiset tiedot. Tietomallinnus toteutetaan tyypillisesti tietokoneavusteisena suunnitteluna, joka on hyvin yksityiskohtaista ja pääasiassa manuaalista mallinnustyötä. Rakennusten ja infrarakenteiden tietomallien sisältämät semanttiset ominaisuudet vastaavat tietyssä määrin kaupunkitietomallista löytyvien CityGML-kohteiden semantiikkaa, jolloin rakennusten ja infrarakenteiden tietomalleja pystytään hyödyntämään kaupunkitietomallin ylläpitoprosesseissa. Suunnittelunaikaisia rakennusten ja infrarakenteiden tietomalleja olisi mahdollista hyödyntää kaupunkitietomallissa.

Kaupungin 3D-mallinnus automaattisin tai puoliautomaattisin fotogrammetrisin menetelmin on useista syistä järkevämpää verrattuna manuaaliseen mallinnukseen. Nykyään on olemassa monenlaisia tekniikoita ja kaupallisia ohjelmistoja, joilla pystytään suuresta määrästä valokuvia muodostamaan lähes automaattisesti koko kaupungin kattavia fotorealistisia kolmiulotteisia kaupunkimalleja eli kolmioverkkomalleja. (Singh et al., 2014.)

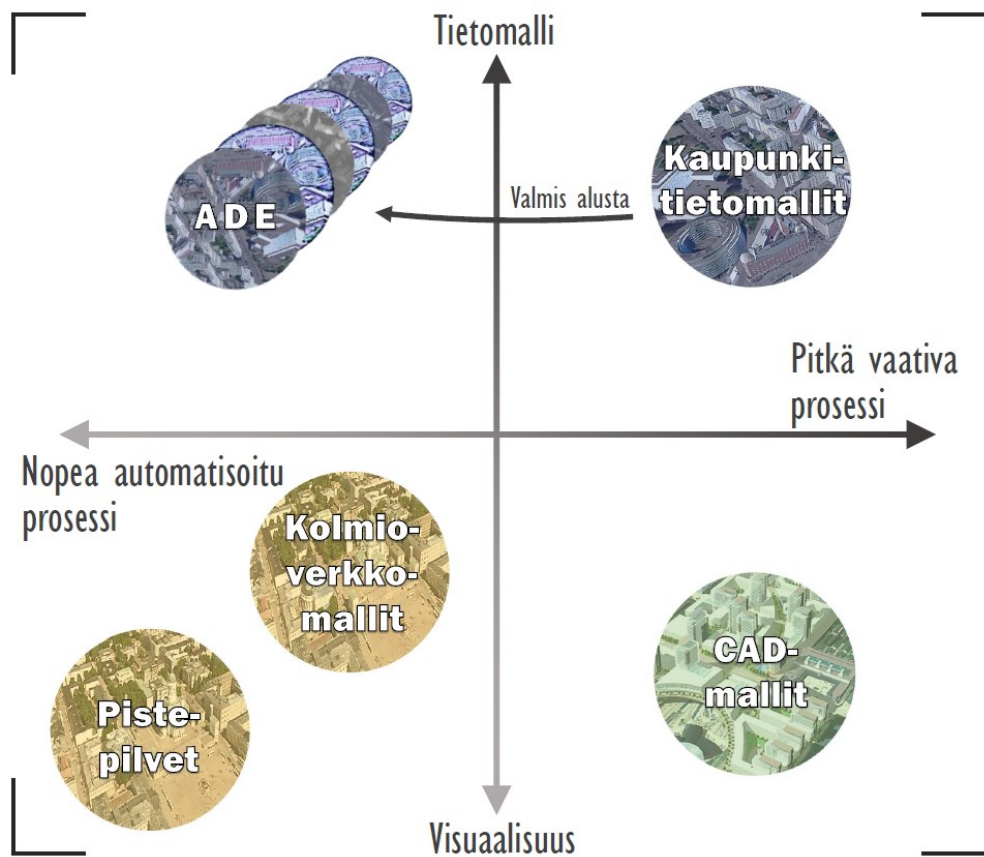
Liping et al. (2015) luettelevat ilmavalokuvien avulla toteutettavan fotogrammetrisen mallinnuksen etuja verrattuna manuaaliseen mallinnukseen:

- **Automatisoitu tuotantoprosessi:** Automaattinen mallinnus viistoilmakuvista ei ole mallintajan osaamisesta riippuvainen.
- **Korkea tuottavuus:** Esimerkiksi 50–80 km<sup>2</sup> kokoinen kaupunki on mahdollista ilmakuvaata yhdessä päivässä ja aineiston automaattinen prosessointi voi olla valmis kahdessa viikossa.
- **Alhaiset tuotantokustannukset:** Tuotannon kustannukset voivat olla 30–60 % manuaalisen mallinnuksen kustannuksista.
- **Aineiston hyvä tarkkuus:** Tällä hetkellä ilmakuvista tuotetun fotogrammetrisen mallin sijaintitarkkuus voi olla alle metrissä.

Kaupungit ovat moniulotteisia ja kompleksisia, koska ne koostuvat niin abstrakteista kuin fyysisistä käsitteistä sekä niiden keskinäisistä vuorovaikutuksista. Semanttiset tietomallit tarjoavat ratkaisun kaupunkien kolmiulotteiseen tietomallinnukseen, sillä nämä tietomallit mahdollistavat fyysisten kohteiden, niiden luonteiden ja kohteiden välisten keskinäisten vuorovaikutusten mallintamisen. Semanttisia kaupunkitietomalleja voidaan käyttää alustana monenlaisiin analyyseihin, simulaatioihin, tietojen etsintään ja paikkatietojen tallennukseen.

Semanttiset kaupunkitietomallit sisältävät mahdollisesti useita erilaisia komponentteja, kuten rakennuksia, siltoja, liikenneverkkoa, vesistöä ja kasvillisuutta. Nämä eri komponentit voivat sisältää lähes rajattomasti semanttista sisältöä ja ominaisuustietoja kohteesta. CityGML-tietomalliin pystytään lisäämään uusia kohteita tai kohteille uusia ominaisuustietoja tietomallin Application Domain Extension (ADE) -laajennusominaisuuden avulla. Laajennusominaisuus voi käsittää esimerkiksi energiakulutustietojen liittämisen rakennuskohteisiin tai kokonaan uuden kaupunkimallikohdeluokan määrittämisen.

3D-kaupunkimallista saadaan suurin hyöty joko välittömästi mallin valmistuttua tai vasta analyysien ja simulaatioiden muodossa. Tätä havainnollistetaan kuvassa 6, jossa esitetään erilaisten 3D-kaupunkimallien sijoittuminen nelikentässä. Vaaka-akselilla arvioidaan, kuinka nopeasti malleista voisi saada hyötyjä. Pystyakselilla tarkastellaan mallien sisältämää informaatiota.



**Kuva 6** Hyödyn havaitseminen eri 3D-kaupunkimallien kohdalla.

Kuvasta 6 voidaan tehdä ainakin seuraavat havainnot: Digitaalisilla valokuvilla värjätty pistepilvi tarjoaa sellaisenaan geometrialtaan pistemäisen ja graafisen 3D-kaupunkimallin käyttöliittymän. Tyypilliset tietokoneavusteiset 3D-mallit ovat toki työläitä, mutta tarjoavat ratkaisun esimerkiksi sovelluksiin, jotka edellyttävät visuaalisuutta ja silmäiltävyyttä. CAD-malleihin verrattuna kolmioverkkomallit ja pistepilvimallit ovat helpompia toteuttaa oikeilla lähtötietoaineistoilla sekä ohjelmistoilla. Nykyään on saatavilla ohjelmistoja, jotka tuottavat



valokuvista lähes automaattisesti korkearesoluutioisia ja fotorealistisia kolmioverkkomalleja (Geospatial Media and Communications, 2017). Lisäksi valmiit pistepilvi- ja kolmioverkkomallit ovat erittäin fotorealistisia 3D-kaupunkimalleja. Sekä geometriaa että semantiikkaa sisältävistä tietomalleista saadaan harvemmin suurin hyöty valjastettua nopeasti käyttöön, koska hyödyt alkavat näkyä vasta pitkällä ajanjaksolla, mutta käyttöskenaariot ovat moniulotteisempia verrattuna geometrisiin malleihin.

Kuvasta 6 voidaan tehdä johtopäätös järkevästi toteutettavissa olevista 3D-kaupunkimalleista niistä saataviin hyötyihin nähden. Nämä toteuttamiskelpoiset kaupunkimallit löytyvät nelikentän vasemman puoleisesta alakentästä, jossa ovat sekä pistepilvet että kolmioverkkomallit, ja oikealla puolella olevasta yläkentästä, jossa sijaitsevat kaupunkitietomallit. Värjätystä pistepilvestä ja kolmioverkkomallista saatava sekä geometrinen että visuaalinen hyöty on heti mallin valmistuttua saatavilla. Näiden mallien tuottaminen on melko nopeaa ja vaivatonta, kun taas kaupunkitietomallin tuotantoprosessi on monivaiheinen ja melko työläs, mutta se on kompensoitavissa mallista saatavilla monipuolisilla hyödyillä. Käyttökelpoinen CityGML-kaupunkitietomalli tarjoaa valmiin alustan uusien kaupunkikohteiden lisäämiseksi kaupunkimalliin ADE-ominaisuuden avulla. Kuvan vasemmassa yläkentässä esitetään useat ADE-laajennusominaisuudet, joita sujuvasti voidaan käyttää uusien kohteiden lisäämiseksi kaupunkitietomalliin, kun on jo olemassa valmis alusta käyttökelpoisesta CityGML-kaupunkitietomallista.

Kolmiulotteisia kaupunkimalleja tuotetaan useilla eri tekniikoilla ja näiden yhdistelmillä. Yleisimmät nykypäivänä käytetyt menetelmät kaupunkimallien lähtötietoaineistojen keruuseen ovat fotogrammetriset menetelmät ja laserkeilaustekniikka. (Singh et al., 2013; Döllner et al., 2005.)

Singh et al. (2013) luokittelevat kaupunkimallinnustekniikat erilaisten lähestymistapojen perusteella seuraavanlaisesti:

**Automaation aste:**

- Automaattinen
- Puoliautomaattinen
- Manuaalinen

**Lähtötietoaineisto:**

- Fotogrammetriset menetelmät
- Laserkeilausmenetelmät

**Fotogrammetriset menetelmät:**

- Ilmakuvaus
- Satelliittikuvaus
- Lähifotogrammetria

**Laserkeilausmenetelmät:**

- Ilmalaserkeilaus
- Maalaserkeilaus

**Hybridimenetelmät:**

Hybridimenetelmät tuottavat kahden tai useamman tekniikan kombinaatiolla kaupunkimalleja.

The 3D radar chart compares four methods across six criteria. The criteria are represented by axes: Automaattinen (Automation), Lähtötietoaineisto (Source Data), Laserkeilaus (Laser Scanning), Fotogrammetria (Photogrammetry), Lähifotogrammetria (Close-range Photogrammetry), and Pistepilvet (Point Clouds). The methods are represented by colored areas: Kaupunkitietomallit (City point cloud models, blue), Kolmioverkkomallit (Triangulation network models, orange), Manuaalinen (Manual, green), and CAD-mallit (CAD models, yellow). The chart shows that City point cloud models and Triangulation network models perform well in most categories, while CAD models are only strong in Automation and Point Clouds.

22

Lähtökohtaisesti kaupunkimalli on tarkoitus tuottaa kustannustehokkaasti. Kaupunkimallinnusmenetelmistä automaation asteen osuus vaikuttaa huomattavasti kaupunkimallin tuotantokustannusten suuruuteen. Manuaalisen työn määrä on suoraan verrannollinen kaupunkimallinnukseen menevään aikaan ja rahaan. Pienten kertaluontoisten 3D-kaupunkimallien mallinnuksessa voidaan harkita manuaalista työtä, mutta suurten kaupunkien mallintamisen ja ylläpitämisen tulisi perustua automaattisiin tai vähintäänkin puoliautomaattisiin mallinnusmenetelmiin (Döllner et al., 2006).

## **2.1 Fotogrammetrinen menetelmä**

Kaksiulotteisista kuvista ei suoraan käy ilmi kolmiulotteisen kohteen geometria, sillä kuvausprosessi tuottaa näkymästä kaksiulotteisen projektion. Kaksiulotteisten kuvien avulla voidaan kuitenkin päätellä kolmiulotteiset ominaisuudet, jotka määritetään laskennallisesti kuvanmuodostuksen sääntöjen perusteella. Kolmiulotteisten kohteiden pinnanmuodot ja valonsäteiden lähtöpisteet ratkaistaan fotogrammetristen perusteiden avulla. Ympäristön kolmiulotteinen mallintaminen onnistuu valokuvia ottamalla, niitä mittaamalla ja tulkitsemalla. Yksikuva-, stereokuva- ja monikuvamittauksia voidaan luotettavasti käyttää kolmiulotteisten tietojen tuottamiseen kaksiulotteisilta kuvilta.

Fotogrammetrisia menetelmiä on jo pitkään käytetty kolmiulotteiseen kartoittamiseen. Valokuvien avulla on mallinnettu kolmiulotteisesti niin rakennuksia, rakennelmia kuin monumentteja. Riittävästä määrästä päällekkäisiä valokuvia mallinnettavasta alueesta tai mistä tahansa kiinnostuksen kohteesta voidaan fotogrammetrisin perustein muodostaa kolmiulotteinen geometrinen malli. Kuvien prosessointi-, varastointi- ja tallennuskapasiteettien hintojen aleneminen ovat osaltaan mahdollistaneet kokonaisten kaupunkien 3D-mallinnusprojektien vaatimien tuhansien kuvien käsittelyn. (Leberl et al., 2012.)

Tällä hetkellä kolmiulotteisessa kaupunkimallinnuksessa hyödynnetään enimmäkseen ilmasta käsin tapahtuvaa tiedonkeruuta, ja lähtötietoaineistona erityisesti ilmakuvat ovat hyvin monikäyttöisiä (Singh et al., 2013). Tavanomaisia alustoja ilmakuvaukselle ovat lentokoneet, miehittämättömät lentoalukset ja helikopterit. Ilmakuvauksen kustannus on laskenut huomattavasti digitaalisten sensorien myötä, mikä on samanaikaisesti mahdollistanut otettavien ilmakuvien määrän lisääntymisen ja radiometristen ominaisuuksien parantumisen. Nämä parannukset ovat edesauttaneet saavuttamaan tarkemman maastoresoluution ja siten parantamaan automaattista kuvien yhteensovitusta. Täysin automaattinen kuvien yhteensovitus toimii paremmin tarkemmilla kuvilla, koska ne takaavat riittävän kontrastin ja tarkempia yksityiskohtia kuvien yhteensovitusta varten. (Leberl et al., 2012.)

Ilmakuvaus voidaan suorittaa sekä pysty- että viistoilmakuvauksena ja viime vuosien aikana viistoilmakuviin perustuvia teknologioita on yhä enemmän ymmärretty hyödyntää maanmittaus- ja kartoitusalailla. Nykyään löytyy kuvausjärjestelmiä, joilla viistoilmakuvaus voidaan toteuttaa samanaikaisesti pystyilmakuvauksen yhteydessä (Vexcel Imaging, 2016). Viistoilmakuvat sisältävät pystyilmakuviin verrattuna enemmän tietoa esimerkiksi rakennusten julkisivuista, minkä vuoksi niiden käyttäminen on erittäin keskeistä fotorealistic kaupunkimallin tuotannossa. (Remondino et al., 2016; Liu et al., 2014.) Tutkimuksissa on todettu, että rakennusten kattojen ja julkisivujen mallinnus on riittävän tarkkaa, kun ilmakuvien maastoresoluutio on noin 1-10 cm (Leberl et al., 2012). Semanttisen kaupunkitietomallin rakennusten julkisivujen teksturoinnissa käytetään hyväksi viistoilmakuvia.

Singh et al. (2013) mukaan lähifotogrammetrian käyttäminen yksinään tai ilmakuvauksen yhteydessä tuottaisi tarkemman kolmiulotteisen mallin, jossa esimerkiksi rakennukset olisi kuvattu läheltä, jolloin niiden yksityiskohdat tulisivat paremmin esille. Erityisen mielenkiintoinen digitaalisten kuvien lähde voisi olla turistien, kaupunkilaisten tai kenen tahansa kaupungista ottamat valokuvat, joiden avulla kaupunkimallia olisi mahdollista päivittää ja tarkentaa (Leberl et al., 2012).

Fotogrammetrinen malli jäljittelee kolmiulotteista maailmaa. Fotogrammetrinen kolmiulotteinen malli voidaan tuottaa kaksiulotteisista kuvista eteenpäinleikkaamalla joko ulkoisesti tai keskinäisesti orientoituja kuvia. Kuvien keskinäisen orientoinnin ratkaiseminen eli kuvien yhteensovitus suoritetaan vastinpisteiden tarkalla mittauksella, joka toteutetaan algoritmien avustuksella. Kuvien yhteensovitus voidaan toteuttaa nykyään täysin automaattisesti, jolloin menetelmä ei vaadi manuaalista työtä. Vastinpisteiden mittaamisessa voidaan käyttää joko paikallisia, globaaleja tai semi-globaaleja-menetelmiä. Vastinpisteet löytyvät kuvien päällekkäisiltä osilta, minkä vuoksi kuvien yhteensovituksen ratkaisemiseksi kuvilta vaaditaan osittaista päällekkäisyyttä. Vastinpisteitä eteenpäinleikkaamalla mitataan rekonstruoitavan kohteen 3D-koordinaatit. Nämä kohdekoordinaatit yhdistämällä toisiinsa muodostetaan kolmiulotteisen kohteen pinta. Pinta voidaan esittää esimerkiksi kolmioverkkona (TIN, Triangulated Irregular Network), johon on sovitettu kuvista otettu tekstuuri.

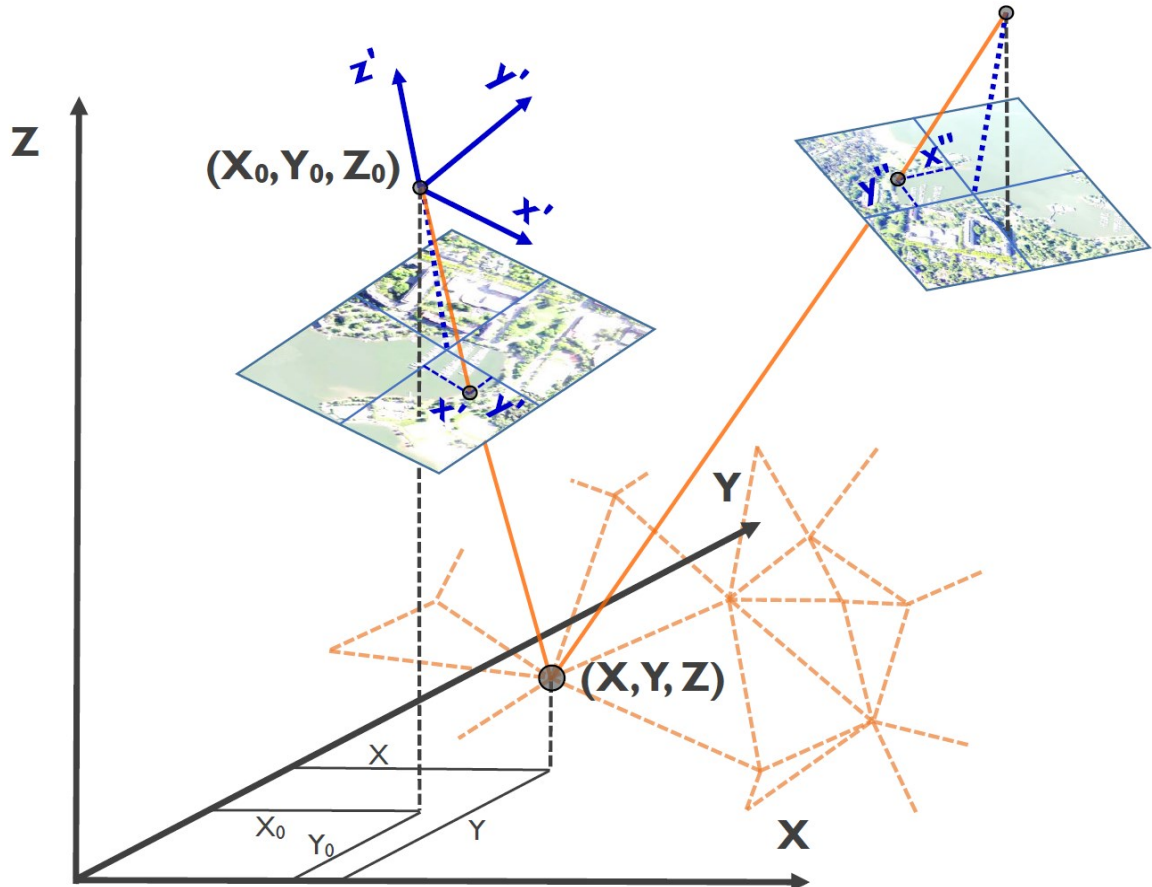
Liu et al. (2014) mukaan fotogrammetrisen pintamallin tuotantoprosessi voidaan jakaa seuraaviin työvaiheisiin: kuvien orientointiin, tiheään yhteensovitukseen, kolmiointiin, yksinkertaistamiseen ja teksturointiin. Kuvien yhteensovitus on yksi kriittisimmistä vaiheista fotogrammetrisen 3D-mallin automaattisessa rakentamisessa. Reaaliaikaiset sovellukset, suuri kokoiset tai lukuisat kuvat vaativat sellaisia kuvien yhteensovituksen algoritmeja, jotka voivat käsitellä aineistoa tehokkaasti ja nopeasti (Hirschmüller, 2005).

### 2.1.1 Eteenpäinleikkaus

Eteenpäinleikkaus on perusehtona fotogrammetristen kolmiulotteisten mallien luomiseen. Eteenpäinleikkauksessa kahden tai useamman kuvan havaintosäteiden avulla määritetään kohteen 3D-koordinaatit. Kuvassa 8 esitetään eteenpäinleikkauksen yleinen tapaus kahdella kuvalla. Eteenpäinleikkaus toimii orientoituilla kuvilla. Orientointina voi olla joko kuvien keskinäinen orientointi mallikoordinaatistossa tai kuvien ulkoinen orientointi kohdekoordinaatistossa. Eteenpäinleikkauksessa kuvan sisäinen orientointi pitää olla tunnettu eli muunnos 2D-kuvakoordinaatistosta 3D-kamerakoordinaatistoon tulee olla ratkaistuna. Kuvan sisäisellä orientoinnilla korjataan kuvan vääristymiä eli tunnetaan kameran sisäinen geometria, jonka avulla kuva yritetään korjata keskusprojektiokuvaksi. Keskusprojektiokuva toteuttaa kollineaarisuusehdon, jonka mukaan kuvapiste, projektiokeskus ja kohdepiste sijaitsevat samalla suoralla. Kohdepisteen 3D-koordinaatit tuotetaan kamera- ja kohdekoordinaatistojen avulla kollineaarisuusyhtälöillä:

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{12}(Y-Y_0) + r_{13}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \\ y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{23}(Z-Z_0)}{r_{31}(X-X_0) + r_{32}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

Yhtälöissä  $c$  on kameravakio, joka on ratkaistu kuvan sisäisen orientoinnin yhteydessä. Kuvan sisäisessä orientoinnissa on ratkaistu myös pääpisteen ja kuvapisteen koordinaatit. Yhtälöissä  $(x_0, y_0)$  ovat pääpisteen koordinaatit ja  $(x, y)$  ovat kuvapisteen koordinaatit, joita kuvassa 8 ovat kuvakoordinaatit  $(x', y')$  ja  $(x'', y'')$ . Yhtälöissä termit  $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}$  ja  $r_{33}$  kuvaavat kamerakoordinaatiston ja kohdekoordinaatiston välisiä kiertoja. Yhtälöissä  $X_0, Y_0$  ja  $Z_0$  ovat kameras projektiokeskuksen koordinaatit. Yhtälöillä ratkaistaan kohdepisteen 3D-koordinaatit  $(X, Y, Z)$ .



**Kuva 8** Eteenpäinleikkaus kahdella kuvalla. (Rönnholm et al., 2005, mukaillen)

### 2.1.2 Kuvien yhteensovitus

Kuvien yhteensovitus -menetelmiä on kehitetty kahdella tieteenalalla, sekä fotogrammetrian että konenäön tutkimuksissa. Fotogrammetrian tutkimus keskittyy enemmän tarkkuuteen ja mittauksen laadunarviointiin, kun taas konenäkö ja digitaalinen kuvankäsittely on enemmän kiinnostunut prosessointitehosta, laskennallisesta toteutettavuudesta ja robusteista algoritmeista. (Forlani et al., 2015.)

Forlani et al. (2015) tutkimuksen mukaan kuvien yhteensovitus -menetelmät voidaan luokitella etsittävien kuvaelementtien perusteella kahteen kategoriaan:

- pisteittäin kulkevat (*point-wise*) tai paikalliset algoritmit
- globaali- tai semi-globaali-algoritmi.

Piirrepohjaisessa paikallisessa kuvien yhteensovituksessa suoritetaan aluksi liitospisteiden valinta, mikä tarkoittaa kuvittain tapahtuvaa automaattista piirteiden valikointia ja irrottamista. Liitospisteiksi valikoituvat hyvin erottuvat piirteet, kuten nurkat ja pilkut. Piirreirrotuksen tavoitteena on etsiä kuvista oleellisia piirteitä käyttäen hyväksi pikselien harmaasävyarvoja. Liitospisteet toimivat alkuarvauksena vastinpisteitä määritettäessä. Näitä liitospisteitä tulee olla todella runsaasti, jotta löydetään mahdollisimman monta vastinapistettä. Lopuksi etsitään valikoiduille liitospisteille mahdollisia vastinpisteitä usealta kuvalta kerrallaan. Aluepohjaisessa paikallisessa menetelmässä etsitään parasta korrelaatiota kuvan ja vastinkuvan välille. Toisen kuvan osaa verrataan toiseen kuvaan ja jokaisessa kuvan kohdassa lasketaan kuvien osien välinen korrelaatioarvo. Vastinpisteeksi valitaan se kohta, joka korreloi eniten.

Kuvien automaattisessa yhteensovituksessa haasteena on oleellisten liitospisteiden löytäminen eri suunnista otetuilta kuvilta. Hieman eri suunnista otetuissa kuvissa voi esiintyä kuvattun kohteen niin valaistus- kuin varjostuseroja, jolloin liitospisteiden etsintä voi vaikeutua ja automaattinen yhteensovitus voi epäonnistua. (Leberl et al., 2012.) Tämänkaltaisiin haasteisiin vastaavat paikallisia menetelmiä paremmin globaali- ja semi-globaali-menetelmät, jotka edustavat tällä hetkellä kehittämiskelpoisia kuvien yhteensovitus -menetelmiä. Ne ottavat huomioon kuvilla esiintyviä eroja, jotka ovat sekä tilassa että ajassa jatkuvia ja johtuvat esimerkiksi kohteen muodosta tai liikkeestä. (Forlani et al., 2015.)

Eräs hyvin käytetty algoritmi automaattiseen kuvien yhteensovitukseen on Structure from Motion (SfM) -algoritmi. SfM-algoritmin toimintaperiaatteen mukaan kuvia tarkastellaan yhden kameran suunnasta. Uusia peräkkäisiä kuvia lisätään kuvien muodostamaan kuvablokkiin. Samanaikaisesti ratkaistaan uudet ulkoiset kuvien orientoinnit ja vastinpisteiden 3D-koordinaatit. SfM-algoritmi valitsee kuvajoukosta yhden stereokuvaparin, jonka sekä keskinäinen orientointi että vastinpisteiden 3D-koordinaatit ratkaistaan. Kuvia lisätään kuvablokkiin laskemalla kuvien välisiä piirteitä ja kuvablokkiin liitetään se kuva, jolla on jo eniten löydettyjä vastinpisteitä. Uuden kuvan orientointi lasketaan vastinpisteiden 3D-koordinaattien avulla. Kaikille kuvablokkiin hyväksytyille kuville lasketaan sädekimpputasoitus, jossa vastinpisteiden havaintovektorien muodostama sädekimppu kiinnittää kuvien geometrian ja kohdepisteiden 3D-koordinaatit toisiinsa. (Rönnholm, 2017.)

Vastinpisteitä eli kuvilta tehtyjä havaintoja käsitellään sädekimpputasoituksessa, jossa kuvat kiinnitetään toisiinsa ja kohdepisteiden sijainnit haluttuun kohdekoordinaatistoon. Sädekimpputasoituksella voidaan ratkaista kuvien absoluuttinen orientointi käyttämällä tukipisteitä. Tukipisteet ovat kohdekoordinaatistossa koordinaateiltaan tunnettuja pisteitä, joita käytetään 3D-mallin sitomiseen haluttuun kohdekoordinaatistoon. Koordinaattimuunnos onnistuu kahden kolmiulotteisen koordinaatiston välillä kolmiulotteisella yhdenmuotoisuusmuunnoksella. Kolmiulotteisen yhdenmuotoisuusmuunnoksen muunnosparametrien ratkaisemiseksi tarvitaan vähintään kolmen yhteisen tukipisteen koordinaatit. Kuvilta automaattisten menetelmien avulla löydetty vastinpisteet toimivat tukipisteiden ohella tasoituksen

lähtöpisteinä. Sädekimpputasoituksessa saadaan kuvien tarkat orientointitiedot, jolloin myös esikalibroimattomien kuvien käyttö on mahdollista.

### 2.1.3 Tiheä yhteensovitus

Tiheän yhteensovituksen tavoitteena on löytää jokaiselle kuvan pikselille vastinpikseli toiselta kuvalta, mikäli se vain on mahdollista. Tulokseksi saadaan tiheä kolmiulotteinen piste-pilvi kaikista löydetystä vastinpisteistä. Tiheän yhteensovituksen -algoritmit arvioivat kuvassa esiintyvien pikseleiden samankaltaisuuksia ja määrittelevät esimerkiksi todennäköisyyksien kautta, ovatko kohteen pisteet vastaavia tai vuorovaikutuksessa keskenään.

Semi-globaali yhteensovitus (SGM, Semi-Global Matching) -menetelmä on yksi tiheän yhteensovituksen algoritmeista. Menetelmä on alkujaan kehitetty tarkkojen fotogrammetristen pintamallien tuottamiseen korkearesoluutioisista ilmavalokuvista (Hirschmüller, 2007). Semi-globaali yhteensovitus -algoritmi tunnistaa ja paikantaa kuvapareilta rekonstruoitavan kohteen yksityiskohtia ja mallintaa kohteen kolmiulotteisesti. Algoritmin toimivuus edellyttää kuvilta suurta sivu- ja pituuspeittoa. Semi-globaali yhteensovitus pyrkii löytämään mahdollisuuksien mukaan jokaiselle pikselille vastinpikselin.

Semi-globaali yhteensovitus -menetelmä tarjoaa hyvän kompromissin algoritmin suoritusajan ja 3D-mallin tarkkuuden välille (Hirschmüller, 2005). Monien kaupallisten fotogrammetristen 3D-mallinnussovellusten ratkaisut ovat ottaneet vaikutteita semi-globaalista yhteensovitus -menetelmästä. Algoritmien kehityksen lisäksi tietokoneiden laskentatehon kasvu tehokkaiden grafiikkaprosessorien myötä on edesauttanut erilaisten innovatiivisten 3D-mallinnussovellusten kehittämisen konenäön alalla. (Leberl et al., 2012.)

## 2.2 Laserkeilauksen periaate

Laserkeilauksen avulla voidaan hankkia kolmiulotteista tietoa kohteeseen koskematta. Laserkeilatuista kohteista, kuten maanpinnasta, puista, rakennelmista, saadaan tuotettua piste-pilvi, joka kertoo kohteiden geometrisesta muodosta. Aluksi laserkeilausmenetelmässä mitattavaan kohteeseen kohdistetaan lasersäde, jonka takaisin heijastuva signaali mitataan. Menetelmässä mitataan aika, joka lasersäteellä kesti matkalla kohteeseen ja takaisin. Etäisyys mitattavaan kohteeseen voidaan määrittää lasersäteen kulkuajan perusteella, koska lasersäteen nopeus on tunnettu. Keilaimen sijainti ja kallistukset rekisteröidään etäisyysmittauksen ajanhetkellä. Lasersäteen lähtökulma keilaimesta tunnetaan. Lopuksi laserkeilaushavainnoista määritetään keilatun kohteen 3D-koordinaateiksi.

Tällä hetkellä hyödynnetään enimmäkseen ilmasta käsin tapahtuvaa tiedonkeruuta 3D-kaupunkimallinnuksessa (Singh et al., 2013). Tiedonkeruuseen käytetään ilmalaserkeilausta sekä ympäristön että kaupungin kolmiulotteisessa mallintamisessa (Hebel et al., 2009).

Ilmalaserkeilain lähettää yleensä lyhyitä laserpulsseja. Ilmalaserkeilausjärjestelmä koostuu paikannus- ja asentomittausjärjestelmästä (GNSS/INS, Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation System), ohjaus-, monitorointi- ja tallennusyksiköstä, laserkeilaimesta, laseretäisyysmittarista sekä alustasta. Differentiaali GNSS rekisteröi koko järjestelmän sijainnin ja inertialaitteisto (IMU/INS, Inertial Measurement Unit/Inertial Navigation

System) tallentaa sekä kallistukset että sijainnin. Ilmalaserkeilaus toteutetaan yleensä lento-koneesta, helikopterista tai miehittämättömästä lentoaluksesta.

Laserkeilausaineiston hankinnan kustannukset ovat yleensä melko korkeat kattaen laitteiston, suunnittelun ja mittauksen kustannukset. Maanmittauslaitoksen tarjoama laserkeilausaineisto on avointa dataa, jolloin aineisto on vapaasti käytettävissä ilman merkittäviä tekijänoikeuden rajoituksia. (Zhu et al., 2015.) Kaupunkimallinnuksen kustannuksissa voi säästää paljonkin, jos on mahdollista hyödyntää avoimia aineistoja. Aineistojen tulee kuitenkin olla melko ajantasaisia, jotta malli ei heti valmistuessaan ole vanhentunut.

### **2.2.1 Laserkeilauspohjainen mallintaminen**

Laserkeilausaineistoa eli pistepilveä voidaan käyttää joko 3D-mallinnuksen lähtötietoaineistona tai pistepilvestä voidaan johtaa muita tuotteita, kuten maasto- ja pintamalleja, joita käytetään 3D-mallinnukseen (Helsingin kaupunki, 2016). Lisäksi valokuvilla värjätty pistepilvi soveltuu sellaisenaan ympäristön kolmiulotteiseen mallintamiseen.

Laserkeilausaineistoa voidaan hyödyntää 3D-kaupunkimallille tärkeimpien kohteiden 3D-mallinnuksessa. Kohteiden 3D-mallinnuksessa voidaan käyttää pelkästään laserkeilausaineistoa tai ottaa muita paikkatietoaineistoja rekonstruoinnin avuksi. Keilausaineiston pistetiheys ei vaikuta 3D-mallinnukseen yhtä paljon, jos ohella käytetään täydentävää tietoa. Rakennusten 3D-mallinnuksessa voidaan käyttää hyväksi rakennusten pohjapiirroksia, jotka määrittelevät rakennusten ulkoreunat. Mikäli 3D-mallinnuksessa käytetään pelkästään laserkeilausaineistoa, on pistetiheyden oltava melko tiheä. (Zhu et al., 2015.) 20 laserpistettä neliometriä kohden on riittävä pistetiheys niin kartta-aineistojen kuin 3D-kaupunkimallien tuottamiseen (Helsingin kaupunki, 2016).

### **PISTEPILVEN LUOKITTELU**

Laserkeilausaineisto prosessoidaan yleensä pistepilveksi, jonka pisteet on luokiteltu eri luokkiin. Pistepilvien luokittelussa käytetään automaattisia luokittelumenetelmiä, kuten yleisesti käytettyä luokittelumenetelmää perustuen ASPRS-luokitteluun. ASPRS-luokittelun on kehittänyt American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) -järjestö. ASPRS-luokituksen mukaiset luokat esitetään taulukossa 1. (ASPRS, 2013.)



**Taulukko 1** Luokitellun pistepilven luokat. (ASPRS, 2013, mukailten)

| Pisteluookka | Luokan nimi                   | Kuvaus  |
|--------------|-------------------------------|---|
| 0            | Created, never classified     | Luokittelematon (Oletus)                          |
| 1            | Unclassified                  | Luokittelematon (Luokittelu ei onnistunut)        |
| 2            | Ground                        | Maanpinta   |
| 3            | Low Vegetation                | Matala kasvillisuus (esim. < 0,20 m maanpinnasta) |
| 4            | Medium Vegetation             | Keskikorkea kasvillisuus (esim. 0,20 - 2,00 m)    |
| 5            | High Vegetation               | Korkea kasvillisuus (esim. > 2,00 m)              |
| 6            | Building                      | Rakennus  |
| 7            | Low Point (noise)             | Matalat virheelliset pisteet                      |
| 8            | Model Key-point               | Mallin ankkuripisteet                             |
| 9            | Water                         | Vesi  |
| 10           | Reserved for ASPRS Definition | Varattu ASPRS:n määrittelylle                     |
| 11           | Reserved for ASPRS Definition | Varattu ASPRS:n määrittelylle                     |
| 12           | Overlap Points                | Lentolinjojen päällekkäiset pisteet               |
| 13-31        | Reserved for ASPRS Definition | Varattu ASPRS:n määrittelylle                     |

Pistepilvi sisältää muun muassa X-, Y- ja Z-koordinaatit kaikille pisteille, kaikuja, heijastuksien intensiteettiarvoja ja aikatietoja, joiden avulla voidaan jakaa pisteitä eri luokkiin (Lingli, 2015). Laserpulssien ominaisuuksien lisäksi pistepilvi voidaan luokitella pisteiden muodostaman laajemman pinnan tai kartta-aineiston avulla muun muassa maanpinta-, matala kasvillisuus-, korkea kasvillisuus- ja rakennus-luokkiin. Luokitellusta pistepilvestä voidaan tuottaa esimerkiksi maasto- ja pintamalleja (Helsingin kaupunki, 2016). Erilaisia ominaisuustietoja, kuten lokaaleja tasaisia pintoja, pinnan karkeutta, intensiteettiarvoja, ensimmäisen ja viimeisen laserkaiun korkeuseroja sekä kohteen muotoa ja kokoa, käytetään hyväksi esimerkiksi rakennusten ja kasvillisuuden erottamiseen toisistaan (Lingli, 2015).

## VÄRJÄTTY PISTEPILVI

Laserkeilauksen yhteydessä suoritettu digitaalinen valokuvaus mahdollistaa pistepilven värjäyksen väriarvoilla, jotka löytyvät valokuvilta. Pistepilven värjäys perustuu toimintaperiaatteeseen, jonka mukaan jokainen laserpiste saa värisävyn siltä valokuvalta, jolta kyseinen piste näkyy lähimpänä. Jokainen laserpiste värjätään pistettä vastaavasta kuvapikselistä löytyvällä väriarvolla. Kuvassa 9 on värjätty pistepilvi, joka on tuotettu ajoneuvon avulla mobiilikeilauksella ja -kuvauksella. (Terrasolid, 2014.)



**Kuva 9** Värjätyllä pistepilvellä mallinnetaan ympäristöä sekä kolmiulotteisesti että fotorealistisesti. (Terrasolid, 2014)

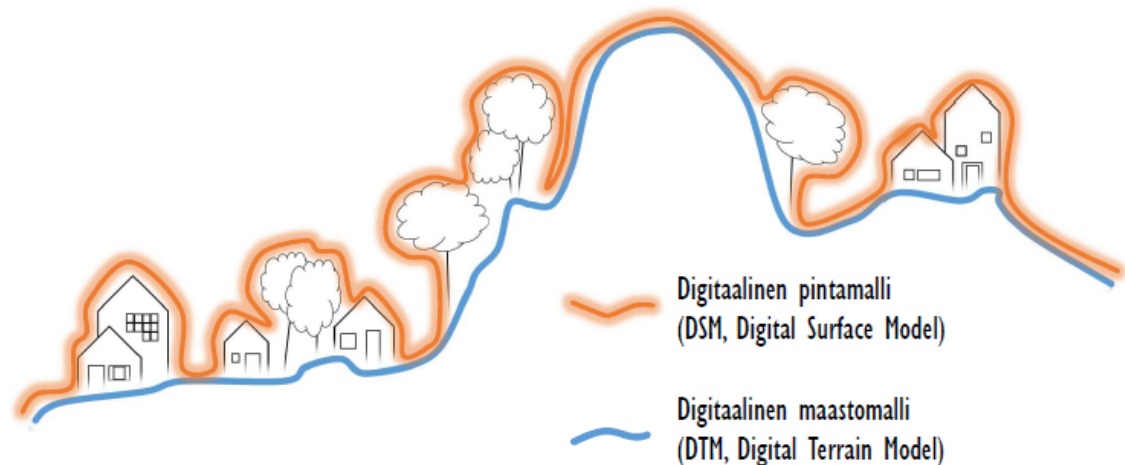
Mobiilikeilauksella ja -kuvauksella saadaan mallinnettua sekä fotorealistisesti että kolmiulotteisesti kaikki ajotieltä näkyvät pienikokoisetkin kohteet. Värjätty pistepilvi sisältää paljon yksityiskohtaista tietoa ympäristöstä ja voi sisältää jopa kymmeniä miljoonia pisteitä. Mitä enemmän pistepilvi sisältää pisteitä, sitä hankalampaa on sen käsittely. Värjätyn pistepilven toinen huono puoli on muiden aineistojen melko hankala liittäminen tällaiseen värjätyn pistepilven muodostamaan 3D-malliin. (Terrasolid, 2014.)

## KORKEUSMALLIT

Laserkeilausaineisto soveltuu hyvin myös digitaalisten korkeusmallien muodostamiseen. Korkeusmalleja pystytään tuottamaan erilaisilla menetelmillä, joista laserkeilaus on aivan omaa luokkaansa tarkan ja hyvälaatuisen mallin tuottamiseen. Korkeusmallilla (DEM, Digital Elevation Model) tarkoitetaan maanpinnan muotoja kuvaavaa mallia, jonka numeerisesta tai kolmiulotteisesta esityksestä käy ilmi pinnanmuotojen muutos korkeuspisteiden välillä. Korkeusmalli kuvataan yleensä joko rasterimuotoisina tasavälisinä hila-alkioina tai vektorimuotoisena epäsäännöllisenä kolmioverkkona (TIN, Triangular Irregular Network). Useimmiten korkeusmallia käytetään yleisenä nimityksenä maasto- tai pintamallille. (FGI.)

Maastomalli (DTM, Digital Terrain Model) on maanpintaa kuvaava malli, joka sisältää lähinnä paljaan maanpinnan korkeustietoja ilman mitään maanpinnan päällä olevia kohteita, kuten puita tai rakennuksia. Maastomallista pystytään tekemään havaintoja muun muassa maan peitteestä, rinteiden kaltevuudesta ja viettosuunnista. Pintamalli (DSM, Digital Surface Model) kuvaa kaikki ne maanpinnalla olevat kohteet, jotka ovat ylimmällä korkeustasolla. Tällöin pintamallin korkeusmalli mukailee pintaa, joka sisältää kaikki maanpinnalla

olevat kohteet, kuten puuston ja rakennukset. (FGI.) Digitaalista maasto- ja pintamallia havainnollistetaan kuvassa 10.



**Kuva 10** Digitaalisen maasto- ja pintamallin havaintoesitys.

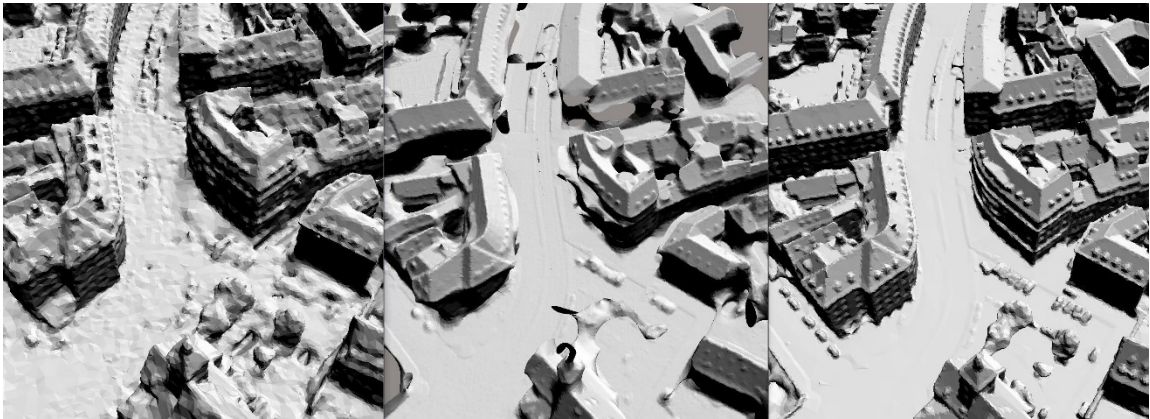
## MULTISPEKTRIKEILAUS

Lähitulevaisuudessa laserkeilaus tulee mullistumaan multispektrikeilaimien kehityttyä riittävästi, jolloin voidaan käytännössä alkaa hyödyntää keilaimia, jotka tallentavat samanaikaisesti usean värikanavan laserpulsseja. Keilaamalla ympäristöä samanaikaisesti usealla aallonpituudella, saadaan tarkempaa ja yksityiskohtaisempaa tietoa, mutta etenkin myös spektristä informaatiota ympäristön kolmiulotteiseen analysointiin. (MML, 2016.) Menetelmää kutsutaan multispektri- tai monikanavakeilaukseksi. Perinteisen yhden kanavan laserkeilauksen haittapuolena on ollut puute spektrisestä ja radiometrisestä informaatiosta, minkä vuoksi laserkeilausaineiston kanssa on useimmiten hyödynnetty digitaalisia valokuvia (Leberl et al., 2012).

Multispektrikeilauksen keskeisin etu on sen ominaiskyky hankkia perinpohjaista sekä rakenteellista että spektristä tietoa todellisesta ympäristöstä. Multispektrikeilauksen myötä saadaan spektristä tietoa esimerkiksi kasvillisuuden lehvästön ohitse metsän syvyyksistä sekä läpikuultavista kohteista. Samankaltainen perinpohjainen tiedonkeruu ei olisi saavutettavissa laserkeilausta ja fotogrammetrisia menetelmiä yhdistelemällä, koska spektrinen vaste on saatavissa silloin vain optisille säteille. (Altmann et al., 2016.)

## FOTOGRAMMETRIAN JA LASERKEILAUKSEN YHDISTÄMINEN

Tällä hetkellä kolmioverkkomalli tuotetaan pääasiassa täysin fotogrammetrisesti lähes automaattisilla 3D-mallinnussovelluksilla. Näitä mallinnussovelluksia kuitenkin kehitetään jatkuvasti, ja viime aikoina kolmioverkkomallin tuottamisessa on pystytty hyödyntämään kuva-aineistojen lisäksi laserkeilausaineistoja. Bentley Systems (2017) on kehittänyt ContextCapture-mallinnussovellusta siten, että sovellus lukee sisään lähtötietoina myös pistepilviä. Kuvassa 11 näkyy kolme eri kolmioverkkomallia, jotka on tuotettu eri lähtötietoaineistoista. Kolmioverkkomallit on tuotettu joko pelkistä kuvista, laserpistepilvestä tai molemmilla edellä mainituilla tietoaineistoilla. (Bentley Systems, 2017.)



**Kuva 11** Kolmioverkkomallit (vasemmalta oikealle) tuotettu eri lähtötietoaineistoista: ensimmäisenä puhtaasti fotogrammetrinen malli, keskellä ilmalaserkeilausaineistosta rekonstruoitu malli ja viimeisenä sekä kuva- että laserkeilausaineistoista tuotettu hybridimalli. (Bentley Systems & Strasbourg'n kaupunki, 2017)

Kuvasta 11 havaitaan, että puhtaasti fotogrammetrinen malli tuottaa paljon enemmän kolmioita, jotka esiintyvät pintojen rosoisuutena. Laserkeilausaineistosta rekonstruoitu malli on yleisilmeeltään melko tarkka, mutta laserkeilausaineistosta tuotettuun kolmioverkkomalliin on syntynyt paljon virheitä. Tosin pistepilvi tuottaa sekä tasaisempia pintoja että myös yksityiskohtaisempaa informaatiota pienistäkin kohteista. Kuvan perusteella hybridimalli on erittäin varteenotettava vaihtoehto kolmioverkkomallin tuottamisessa. Hybridimalli on tuotettu sekä kuva- että laserkeilausaineistojen avulla, ja malli on rekonstruoitu ottaen huomioon kummankin teknologian parhaat puolet. Fotogrammetrisessä mallissa syntyviä epätasaisia pintoja ja kolmioita on vähennetty pistepilven tuottamien tasaisten pintojen avulla. Lisäksi hybridimallissa näkyy pienetkin yksityiskohdat paljon paremmin kuin yhtä teknologiaa hyödyntävissä malleissa. (Bentley Systems, 2017.)

Kuvan 11 keskimäinen kolmioverkkomalli näyttää olevan tuotettu laserkeilausaineistosta, joka on kerätty ilmasta suoritetulla keilauksella. Ilmalaserkeilausaineistosta tuotettu kolmioverkkomalli käsittää tasaisia katupintoja ja rakennusten kattoja, kun taas rakennusten seinäpinnat ja muut kohtisuorat elementit keilausjärjestelmään nähden ovat jääneet rekonstruomatta. Tämä johtuu täysin ilmasta tehdystä keilauksesta. Mikäli laserkeilaus suoritettaisiin mobiilikeilauksena, olisi hybridimalli mobiilikeilausta ja ilmakuvausta hyödyntäen toteutettuna entistä laadukkaampi ja tarkempi.



## 2.3 Kaupunkitietomallintaminen

Kolmiulotteisia kaupunkimalleja on toteutettu puhtaasti graafisina ja geometrisina malleina, jotka keskittyvät pääasiassa tiedon visualisointiin ja niiden perimmäisenä tarkoituksena on ollut mahdollisimman fotorealistinen esitystapa. Nämä geometriset kaupunkimallit eivät ilman semantiikkaa ja topologiaa sovellu analysointitehtäviin, temaattisiin kyselyihin tai spataaliseen tiedonlouhintaan. CityGML-kaupunkitietomallistandardi kehitettiin täyttämään monen eri toimialan vaatimuksia 3D-kaupunkimallien käyttötarkoituksista. CityGML-muotoinen kaupunkitietomalli havainnollistaa ympäristöä sekä geometrisesti, graafisesti että semanttisesti. (Döllner et al., 2006.)

Ervingin (2008) mukaan CityGML-mukaisen tietomallin tuotanto voidaan jakaa viiteen vaiheeseen: lähtötietoaineistojen keruuseen, 3D-mallinnukseen, georeferointiin, semantiikan lisäämiseen ja mallin tallentamiseen CityGML-muotoon. CityGML-tietomallin tuottamiseen voidaan soveltaa useita erilaisia tuotantopolkuja, mutta lähtökohdat ovat yleensä samanlaiset.

3D City Database (3DCityDB) on maksuton ja avoimeen lähdekoodiin perustuva 3D-paikkatietoaineistojen tietokanta. 3DCityDB-tietokantaa voidaan käyttää CityGML-muotoisten kaupunkitietomallien tallennukseen, katseluun ja hallintaan. Tietokantaa on mahdollista ylläpitää, päivittää ja tietokannasta käsin voidaan esittää kohteita. Relaatiotietokannan sisältö vastaa suuressa määrin CityGML-tietomallin määrittämiä. Monet kaupungit ympäri maailmaa hyödyntävät 3DCityDB-tietokantaa CityGML-kaupunkitietomallien käyttö- ja ylläpitopaikkana. Lisäksi melkein kaikilla Saksan maanmittausvirastoilla on käytössä 3DCityDB-tietokanta. (3D City Database, 2017.)

### 2.3.1 CityGML-tietomallista yleisesti

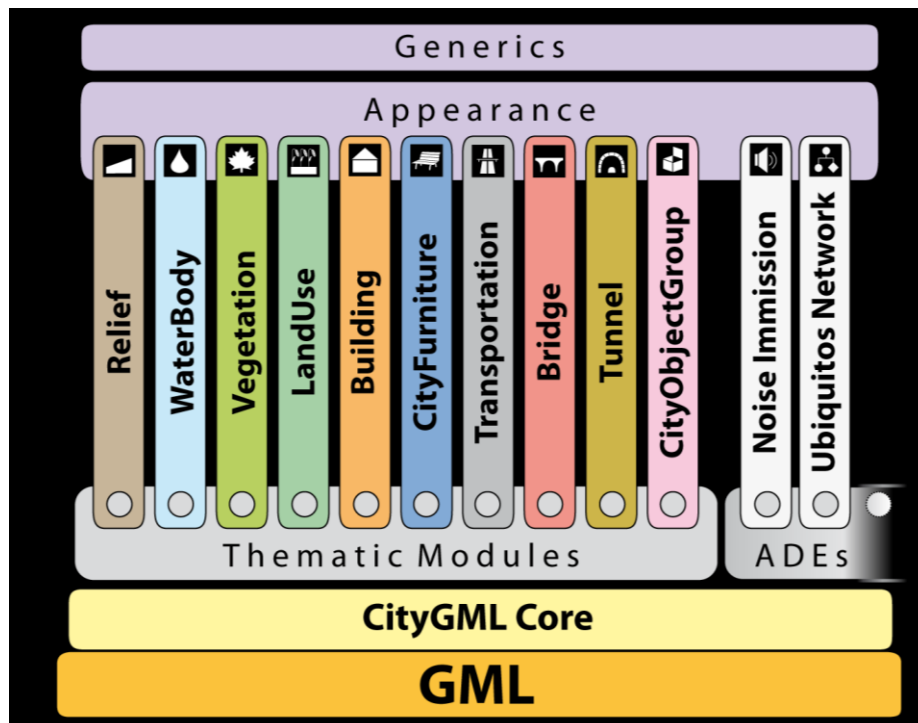
Open Geospatial Consortium (OGC) on avoimien paikkatiedon ja paikkatietopalvelujen standardointiin keskittynyt vapaaehtoinen ja kansainvälinen konsortio. OGC koostuu yli 500 niin julkisesta kuin yksityisestä tahosta, jotka eri puolilla maailmaa tekevät yhteistyötä kehittäessään avoimia standardeja. Kansainvälinen standardi CityGML on OGC:n hyväksymä avoin tietomalli ja XML-pohjainen tiedostomuoto 3D-kaupunkitietomallien tallennukseen ja jakamiseen. CityGML-standardin perusajatuksena on tuottaa yleiset määrittäykset 3D-kaupunkimallin olennaisille kokonaisuuksille, ominaisuuksille ja yhteyksille. Standardisoinnin päämääränä on tuottaa kustannustehokkaasti 3D-kaupunkitietomalli, jonka ylläpitäminen ei vaatisi suuria resursseja ja joka voisi olla hyödynnettävissä monilla eri toimialoilla. CityGML:n on alkujaan kehittänyt ryhmä nimeltään SIG 3D (Special Interest Group 3D), joka koostuu yli 70 yrityksestä, kunnasta ja tutkimusryhmästä Saksasta, Isosta-Britanniasta, Sveitsistä, Itävalasta ja Hollannista. (OGC, 2012.)

CityGML perustuu ISO 191xx-perheen useisiin standardeihin. Vuonna 2012 tuli voimaan viimeisin CityGML-versio 2.0.0, ja parhaillaan on kehitteillä CityGML-versio 3.0.0. CityGML pohjautuu Geographical Markup Language versio 3.1.1 (GML3) -kieleen ja sen XML-sovellusskeemaan. GML3 on XML-pohjainen tiedostomuoto ja OGC:n kehittämä avoin standardi paikkatiedon mallintamiseen ja koodaamiseen. GML3 perustuu ISO 19107-standardiin. GML3-kieli mahdollistaa kolmiulotteisten CityGML-kohteiden tiedonsiirron,

muokkaamisen ja mallintamisen eri rajapintapalveluiden ja paikkatietosovellusten välillä. (OGC, 2012.)

Semanttisten tietomallien laaja käyttäjäkunta ja monipuoliset sovellusalueet ovat tehneet kaupunkitietomallinnuksesta yhä suositumpaa. Keski-Euroopan suurissa kaupungeissa ylläpidetään avoimen CityGML-standardin mukaisia kaupunkitietomalleja, mutta myös Aasian suunnalla hyödynnetään CityGML-tietomalleja. CityGML-standardista on tullut Hollannissa jopa kansallinen kaupunkimallistandardi. (Helsingin kaupunki, 2016.)

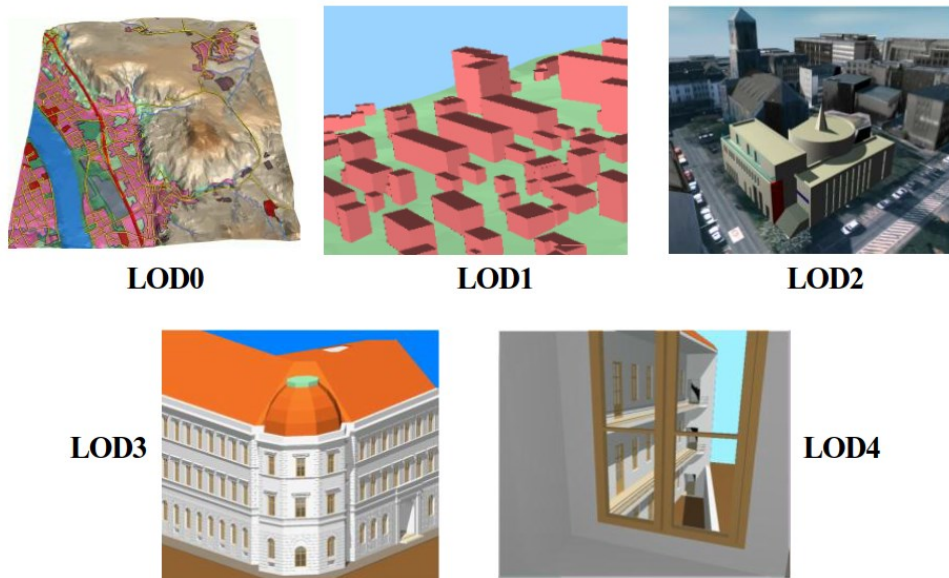
CityGML-standardi sisältää kaupunkimallille tärkeimpien kohteiden ja niiden luokkien määritelmät. CityGML-tietomalli koostuu kahdesta eri temaattisesta osasta: ydinmoduulista (*core module*) ja laajennusmoduuleista (*extension modules*). Ydinmoduuli sisältää CityGML-tietomallin peruskäsitteet ja -komponentit. Laajennusmoduulien avulla voidaan tietomallille lisätä uusia temaattisia luokkia. Kaupunkimallille tärkeimmät kohteet on jaettu ominaisuuksiensa mukaan eri temaattisiin moduuleihin. Näitä CityGML-kielellä mallinnettavia temaattisia kohteita ovat esimerkiksi maastomallit, rakennukset, sillat, vesi- ja liikennealueet, kasvillisuus ja katukalusteet. Kuva 12 esittää CityGML-tietomallin kokonaisuutta. Kolmiulotteisille kaupunkimallikohteille voidaan lisätä ulkoasu (*appearance*), joka voi olla mikä tahansa visualisointitapa. Ulkoasulla voi visualisoida kohteita pinnanmuotojen, tekstuurien, materiaalien tai teemojen mukaan. CityGML-tietomallin Application Domain Extension (ADE) on laajennusominaisuus, jolla voi lisätä tietomalliin uusia kohteita tai ominaisuuksia. ADE:n avulla voidaan lisätä rakennuksille esimerkiksi energiatietoja. (OGC, 2012.)



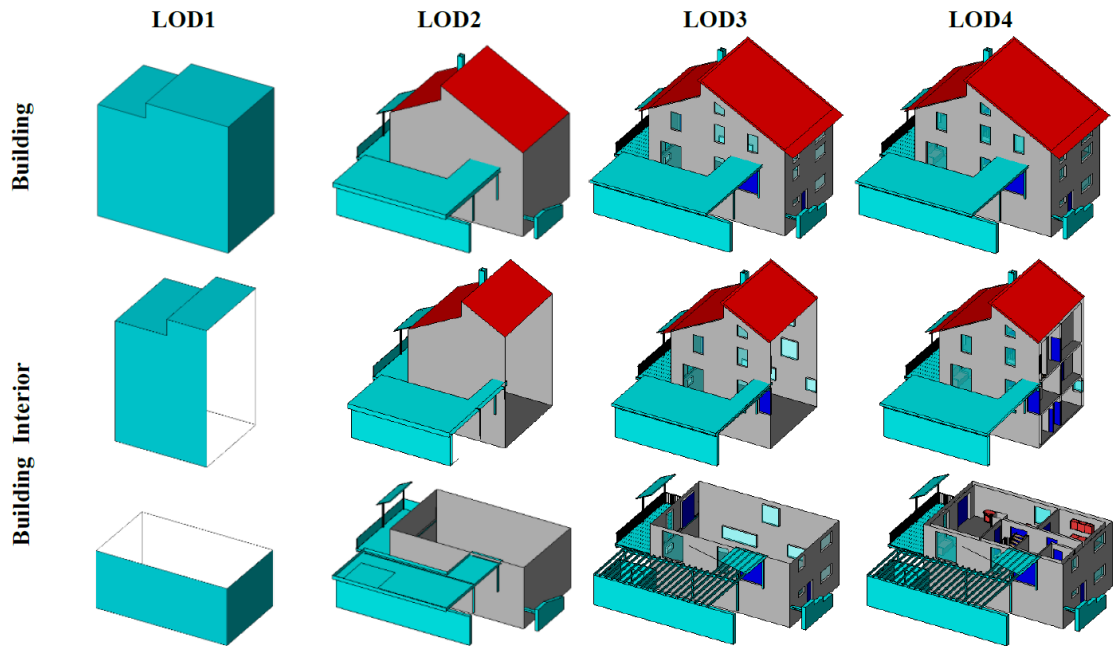
**Kuva 12** CityGML-tietomallin osien muodostama kokonaisuus. (virtualcitySYSTEMS, 2017a)

### 2.3.2 Tarkkuustasot

CityGML mahdollistaa kohteiden geometrysten, topologisten, semanttisten ja visuaalisten ominaisuuksien kuvaamisen viidellä eri tarkkuustasolla (LoD, Level of Detail). Kuvassa 13 on lähestytty LoD-ajatusta rakennusten kautta. Kuvassa näkyy viisi tarkkuustasoa, LoD0–LoD4, joiden mukaan kaupunkimallikohteet on mallinnettu sitä yksityiskohtaisemmin mitä suurempi taso on kyseessä. Karkein LoD0-taso sisältää lähinnä digitaalisen maastomallin, jonka päällä voidaan kuvata kaupunkimallikohteita polygoneina. LoD0-tasolla kohteet on kuvattu kaksi- ja puoliulotteisina (2,5D), minkä vuoksi kolmiulotteisten rakennusten tarkkuustasoja on neljä ja ne näkyvät kuvassa 14. LoD1-tasolla rakennukset on kuvattu suorakulmioina ja tasakattoisina. LoD2-tason rakennuksilla erottuvat kattojen erilaiset muodot ja pinnat. LoD3-tason rakennukset sisältävät arkkitehtuurisia piirteitä ulkokatoista ja -seinistä, kuten ikkunat ja ulko-ovet. Tarkimmalla LoD4-tasolla rakennusten sisätilat ja hyvin pienetkin yksityiskohdat on mallinnettu. Vastaavat tarkkuustasot on määritetty myös muille kaupunkimallikohteille, mutta määritykset eivät ole yhtä täydelliset kuin rakennusten osalta. (OGC, 2012.)



**Kuva 13** CityGML-tietomallin viisi tarkkuustasoa. (OGC, 2012)



**Kuva 14** Rakennus-moduuli esitettynä LoD1–LoD4-tasoilla. (OGC, 2012)

Kaupunkimallien tehokas tietojen analysointi ja visualisointi on mahdollista CityGML-kohteiden eri tarkkuustasojen avulla. CityGML-tietomalli soveltuu niin pienimittakaavaisten kohteiden kuin laajojen alueiden esittämiseen. (Kolbe, 2009.)

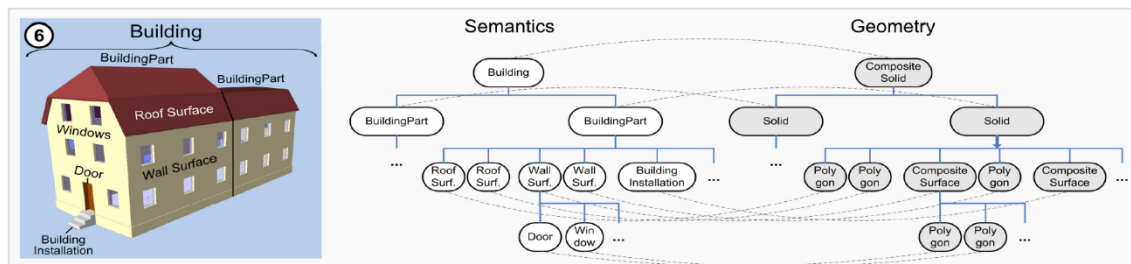
Vaikka CityGML-kohteita voidaan tuottaa viidellä eri LoD-tasolla, koko kaupungin laajuisen kolmiulotteisen tietomallinnus on kustannustehokasta tehdä joko LoD1- tai LoD2-tasolla automaattisen mallinnuksen ja jo olemassa olevien paikkatietoaineistojen vuoksi. Lisäksi LoD2-tasoinen malli on riittävän tarkka keskeisimpiin analyysihin ja simulaatioihin. Koko kaupungin laajuisen kolmiulotteisen mallin tuottaminen LoD2-tasoisena pystytään suorittamaan lähes automaattisesti. LoD2-tasoinen kaupunkimalli voidaan muodostaa käyttämällä yhdessä sekä jo kunnilla olemassa olevia kartta- ja paikkatietoaineistoja että erikseen hankittavia laserkeilaus- ja ilmakuvauksaineistoja. LoD3- tai LoD4-tasoinen koko kaupungin laajuisen mallin tuottaminen ei ole nykyhetkellä järkevää, sillä sen tuottaminen vaatii paljon yksityiskohtaista informaatiota mallinnettavista kohteista.

### 2.3.3 Spatio-semanttinen koherenssi

CityGML-tietomallin avulla voidaan kaupunkimallin kohteet esittää niin graafisesti kuin geometrisesti, mutta CityGML-tietomalli kuvaa kohteet myös semanttisesti, temaattisesti, topologisesti ja taksonomisesti. Semanttisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan reaali maailman kohteiden rakenteiden, luokkien ja kohteiden välisten suhteiden kuvaamista topologioilla, tietosisällöillä tai ulkoasuilla. CityGML:n perusoletuksena ovat yhtenäiset mallintamistavat ja rakenteet sekä semanttisille että spatiaalisille ominaisuuksille. (OGC, 2012.)



CityGML-tietomalli sisältää siis kaksi hierarkiarakennetta, semanttisen ja spatiaalisen, joiden toisiaan vastaavat kohteet on linkitettyinä toisiinsa. Tämä on CityGML-kielen primaaritavoite, jota kutsutaan spatio-semanttiseksi koherenssiksi eli semanttisten ja spatiaalisten ominaisuuksien koherentiksi mallinnukseksi. Tässä tapauksessa koherenssilla tarkoitetaan nimenomaan kohteiden semanttisten ja spatiaalisten ominaisuuksien välisten suhteiden johdonmukaista määrittelyä. Spatio-semanttista koherenssia havainnollistaa kuva 15, jossa on esitetty CityGML-rakennuksen semanttisten ja geometrysten ominaisuuksien väliset yhteydet. Geometriset kohteet tietävät, mitä ne ovat, ja semanttiset ominaisuudet tietävät, missä ne sijaitsevat ja mikä on niiden spatiaalinen ulottuvuus. CityGML-tietomallissa voidaan liikua mielivaltaisesti eri hierarkiatasolta toiselle, mutta myös samanaikaisesti eri hierarkioissa. (Stadler et al., 2007.)



**Kuva 15** CityGML-rakennuksen spatio-semanttinen koherenttimallinnus. (Stadler et al., 2007)

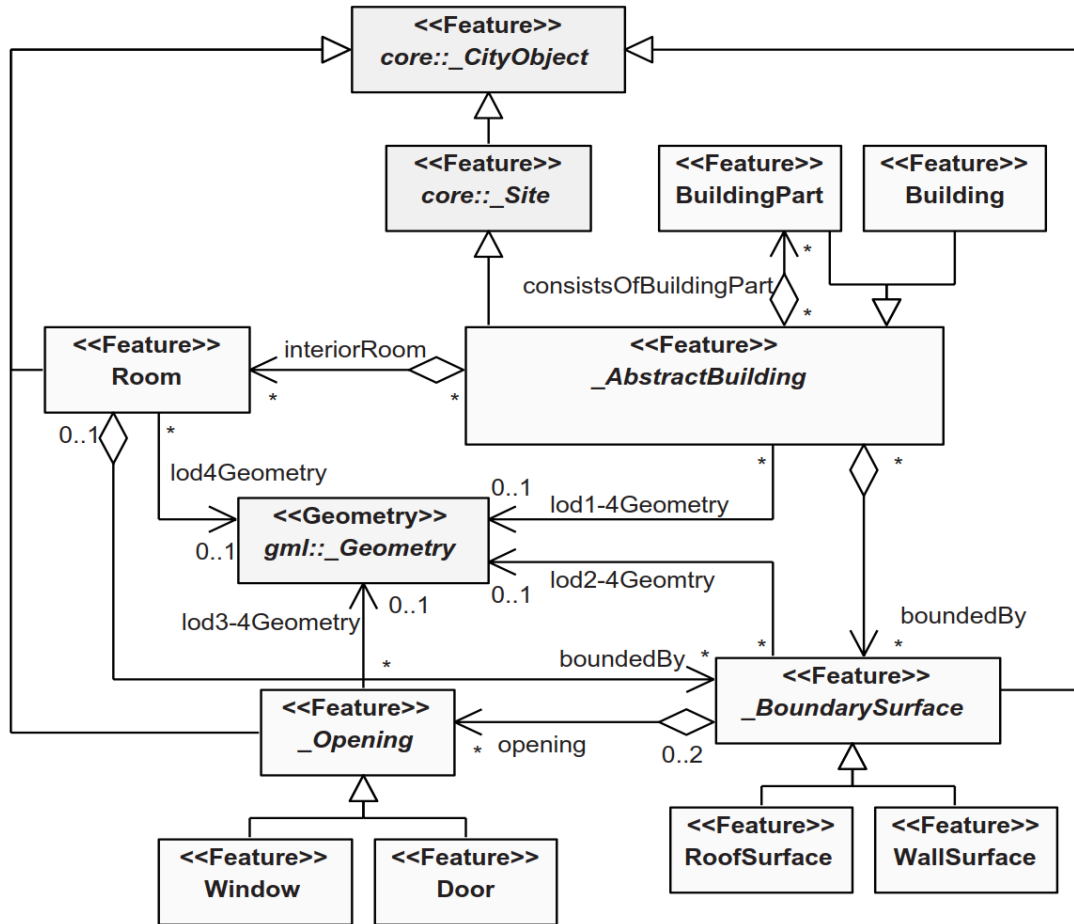
ISO 19107 -standardin ja GML3-kielen mukaisesti paikkatietoelementtien geometriat on identifioitu. Paikkatietoelementtien geometriat sisältävät hierarkiamäärittelyt muihin geometrioihin. GML3-kieli mahdollistaa CityGML-kohteille geometriaprimitiivit, joita voivat olla pisteet (*point*, 0D), viivat (*curve*, 1D), pinnat (*surface*, 2D) ja kappaleet (*solid*, 3D). Näitä primitiivejä yhdistelemällä voidaan muodostaa komplekseja (*complexes*), komposiittigeometrioita (*composite geometries*) ja yhdistelmiä (*aggregations*). ISO 19107 -standardi mahdollistaa paikkatietoelementin luokittelun useampaan kuin yhteen luokkaan, minkä vuoksi CityGML-kohte voi olla samanaikaisesti mallinnettuna eri LoD-tasoilla. CityGML-kohteiden geometrioiden tulee olla topologisesti eheitä, kuten rakennusta ympäröivä pinta tulee mallintaa suljettuna, jotta kohteiden tilavuuksia ja massoja voidaan laskea. Topologinen eheys on perusehto monien sovellusten temaattisille ja geometrisille kyselyille. CityGML määrittelee tarkasti eri geometrysten komponenttien väliset topologiset rakenteet. Siinä missä yhdistelmägeometriat voivat sisältää mielivaltaisesti mitä tahansa geometriaprimitiivejä, komposiittigeometriat koostuvat vain sellaisista primitiiveistä, jotka ovat rajoittaan topologisesti yhteydessä toisiinsa. (Kolbe, 2009.)

CityGML-tietomalli tarjoaa luokkien määritelmät, tietyt säännönmukaisuudet ja semantiikan kuvaukset tärkeimmille paikkatietoelementeille, joita 3D-kaupunkimallinnuksessa ovat esimerkiksi rakennukset, maastomallit, vesielementit, kasvillisuus ja katukalusteet. Perusluokka kaikille temaattisille luokille on abstrakti luokka *CityObject*. *CityObject*-luokan alaluokat koostuvat erilaisista temaattisista paikkatietoelementeistä, joiden määrittelyt löytyvät vastaavista moduuleista. (Kolbe, 2009.)

Jokainen *CityObject* voidaan linkittää muissa tietokannoissa oleviin objekteihin. *CityObject*-kohteeseen voidaan viitata objekteilla ulkoisissa tietokannoissa, joita ovat muun muassa kiinteistörekisteri, hallinta- ja toiminnanohjausjärjestelmät tai muut sovelluskohtaiset tietokannat. Tämä mahdollistaa sen, että CityGML-mallissa voidaan säilyttää yhteydet alkuperäisiin kohteisiin, joista 3D-kaupunkimallikohteet on alun perin mallinnettu, mikä on erittäin hyödyllistä mallin ylläpidolle ja käytölle. (Kolbe, 2009.)

### 2.3.4 Rakennus-moduuli

Rakennus-moduuli sisältää yksityiskohtaiset sekä temaattiset että spatiaaliset käsitteet rakennuksista ja rakennusten osista viidellä eri yksityiskohtaisuustasolla. Rakennus-moduuli määritellään CityGML:n temaattisella laajennusmoduulilla *Building*. Kuvassa 16 näkyy yksinkertaistettu UML-kaavio CityGML-mukaisesta rakennus-moduulista, josta käy ilmi esimerkiksi *AbstractBuilding*-luokan geometrinen esitys ja semanttinen rakenne. Moduulin pääluokka on *AbstractBuilding*, joka on alaluokka temaattiselle luokalle *Site* ja jonka juuri sekä perusluokka on *CityObject*. *AbstractBuilding*-luokka perii kaikki *CityObject*-perusluokan ominaisuudet, jotka on osoitettu luokalle *CityObject*, kuten GML3-standardin *gml:name*-ominaisuuden ja CityGML:n erityisen ominaisuuden *ExternalReferences*, joka mahdollistaa objektien ulkoisen tietokannan lisäyksen. *AbstractBuilding*-luokkaan sisältyvien ominaisuuksien lisäksi malliin voidaan lisätä uusia kohteita ja ominaisuuksia CityGML:n *Generics*-moduulin avulla tai käyttämällä CityGML:n ADE-ominaisuutta. (OGC, 2012.)



**Kuva 16** Yksinkertaistettu UML-kaavio CityGML-muotoisesta *Building*-moduulista. (Kolbe, 2009)

*CityObjectGroups*-luokan avulla voidaan koota yhden käsitteen alle kaikki rakennukset, jotka muodostavat yhden rakennuskompleksin, kuten tehdas- tai sairaala-alueen useat erilliset rakennelmat. Rakennuskompleksin päärakennus voidaan merkitä roolinimellä ”päärakennus”. *AbstractBuilding*-luokka käsittää joko koko rakennuksen eli *Building*-luokan tai rakennuksen osan eli luokan *BuildingPart*. Nämä kolme luokkaa noudattavat yleistä suunnittelun yhdistelmämallia, jonka mukaan luokka *Building* voi sisältää *BuildingPart*-luokkia, jotka on siis johdettu luokasta *Building*, mutta myös luokasta *AbstractBuilding*. Näin toteutuu rekursiivinen rakenteiden yhdistäminen hierarkkisesti eritasoisille luokille, mikä näkyy esimerkiksi kuvassa 16. (OGC, 2012.)

*Building*- ja *BuildingPart*-luokat voivat kumpikin periä seuraavia ominaisuuksia *AbstractBuilding*-luokalta: rakennuksen luokka, toiminto (esimerkiksi asuinrakennus, teollisuusrakennus tai julkinen rakennus), käyttötarkoitus, rakennusvuosi, purkuvuosi, katto-muoto, mitattu korkeus sekä kerroksien määrä ja yksittäiset korkeudet maanpinnan ylä- ja alapuolella. Lisäksi luokille *Building* ja *BuildingPart* voidaan määrittää useitakin osoitteita. (Kolbe, 2009; OGC, 2012.)

CityGML-muotoiset rakennukset voidaan mallintaa rakennus-moduulin LoD0–LoD4-tarkkuustasoilla. CityGML-mallin toteutuksessa kullakin LoD-tasolla on vähimmäisvaatimuskriteerit rakennuksen tietyistä objektiluokista. CityGML-kohde voi olla myös samanaikaisesti mallinnettuna eri LoD-tasoilla. Rakennus-moduulista otetaan käyttöön tietyt objektiluokat määritetyn yksityiskohtaisuustason mukaan. LoD0-tasolla rakennus on esitetty kolmiulotteisena tasopintana, joka voi olla mallinnettuna rakennuksen kivijalkavektorista tai katon reunasta. Tämä vuoksi malliin on helppo integroida kaksiulotteista dataa. Monissa maissa kaksiulotteisia paikkatietoaineistoja on jo olemassa, kuten kiinteistörekisteritietoja ja kartta-aineistoja. Kaksiulotteisista kartta-aineistoista voi käydä ilmi rakennuksen kivijalan ulottuvuus ja muoto sekä rakennuksen katon reunojen korkeus ja muoto. LoD1-tason rakennuksella on sen ulkokuoresta yleistetty geometrinen muoto ja rakennuksen katto kuvataan tasakattona. LoD2-tasolta lähtien kuvataan rakennusten kattomuodot, jolloin tarvitaan kolmiulotteista tietoa kattomuodon geometriasta. (OGC, 2012.)

LoD2-tasoisten rakennusten seinien sijainti voidaan määrittää esimerkiksi kartta-aineistosta, jolle on viety joko rakennusten kivijalka tai katon reuna. Suomessa asemakaavan pohjakartalle on viety seinälinjojen lisäksi myös räystäslinjoja, joiden avulla rakennusten seinien mallinnus voidaan suorittaa. Tosin räystäslinjojen käyttäminen rakennusten seinien mallintamisessa tuottaa tilavuudeltaan suuremman rakennuksen kuin seinälinjojen käyttäminen. Kuitenkin tärkeää rakennusten tietomallinnuksessa on CityGML-rakennusten yhteensopivuus jo olemassa olevien kartta- ja paikkatietoaineistojen kanssa. CityGML-rakennusten yhteensopivuus asemakaavan pohjakartan rakennusten kanssa mahdollistaa aineistojen integroinnin ja päivittämisen 3D-kaupunkimalliin.

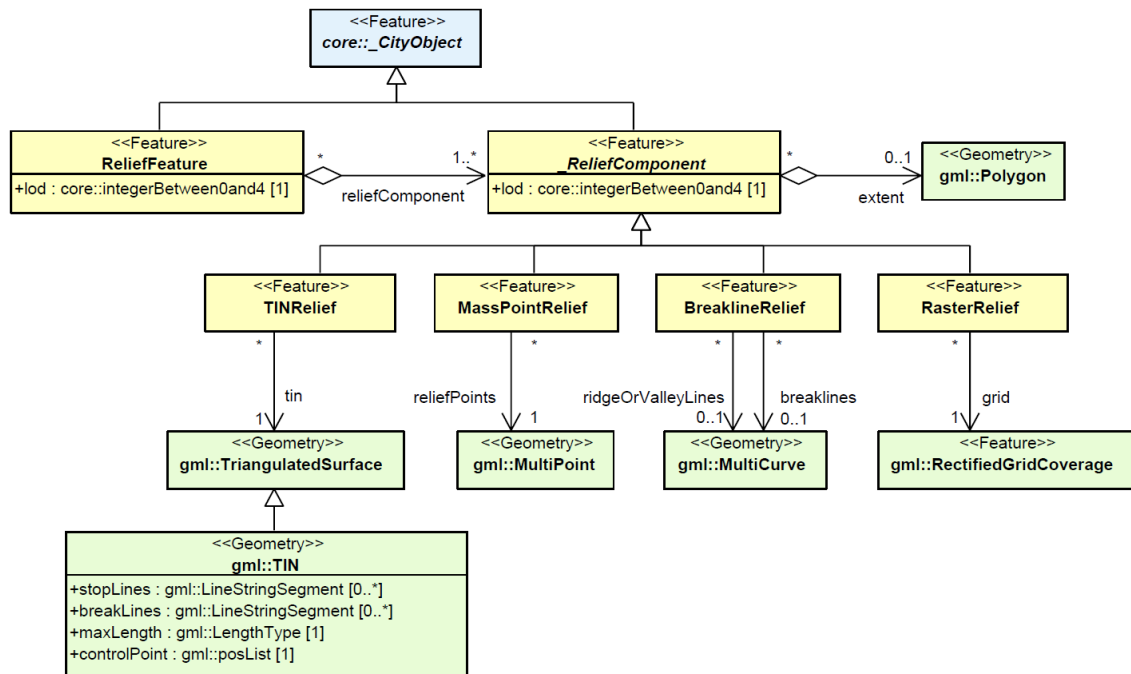
LoD2- tai ylemmällä tasolla rakennusten eli *Building*- ja *BuildingPart*-kohteiden julkisivuja määrittävät pinnat voidaan jakaa useampiin semanttisiin kohteiseen, luokkiin *BoundarySurface* ja *BuildingInstallation* (OGC, 2012). *BoundarySurface* on pääluokka luokille *RoofSurface* (kattopinnat), *WallSurface* (seinät), *GroundSurface* (rakennuksen maapohja) ja *ClosureSurface* (täytepinnat). Nämä kaikki ovat peräisin juuresta *CityObject*, jolloin ne perivät kaikki juuren attribuutit ja relaatiot. LoD3- ja LoD4-tasoilla tarkastellaan jo ulkopintojen yksityiskohtia, kuten ikkunoita (*Window*) ja ovia (*Door*). LoD4-tasolla mallinnetaan rakennusten sisätiloja huoneilla (*Room*). (Kolbe, 2009.) *BuildingInstallation*-luokkaa käytetään kiinteiden rakennuselementtien, kuten parvekkeiden, savupiippujen, kattoikkunoiden tai ulkoportaiden, mallintamiseen. Nämä voivat saada ominaisuustietoina muun muassa käyttötarkoituksen ja kuvauksen (OGC, 2012).

CityGML-tietomallin säännönmukaisuudet mahdollistavat rakennusten tietomallinnuksen, mutta myös rajoittavat rakennusten mallintamistapoja. Vaikka CityGML-kieli voidaan kokea liian rajoittavana tekijänä mallintamistavan valinnassa, niin käyttäjät ja heidän sovellukset voivat odottaa esimerkiksi hyvin jäsenneltyjä, mallinnettuja ja määriteltyjä rakennuksia. On siis kannattavaa kehittää uusia sovelluksia, jotka hyödyntävät CityGML-tietomallin semantiikkaa ja rakennetta. (Kolbe, 2009.)

### 2.3.5 Maanpinta-moduuli

CityGML-tietomalliin voidaan lisätä erilaisia kohdetyppejä kaupunkiympäristön kuvaamista varten. Yksi olennaisimmista kaupunkimallin osista on maanpinta. *Relief*-moduuli mahdollistaa digitaalisen maastomallin (DTM, Digital Terrain Model) lisäämisen CityGML-

tietomalliin. Kuvassa 17 esitetään tämän digitaalisen maastomallin eli maanpinta-moduulin UML-kaavio. (OGC, 2012.)



**Kuva 17** UML-kaavio CityGML-tietomallin maanpinta-moduulista. (OGC, 2012)

CityGML-tietomallin luokan *ReliefFeature* avulla maanpinta voidaan kuvata LoD0–LoD4-tarkkuustasoilla, jotka esittävät erilaisia tarkkuuksia tai resoluutioita (OGC, 2012). Maastomallille voidaan määrittää useita pintatekstuureita. Esimerkiksi maastomallin pintatekstuurina voidaan käyttää ilmakuvia silloin, kun kohdetta tarkastellaan lähietäisyydeltä. Satelliitit kuvat ovat käyttökelpoisia maastomallin tekstuurina silloin, kun kohdetta katsotaan kauempaa. (Erving, 2008.)

*ReliefFeature* koostuu yhdestä tai useammasta luokan *ReliefComponent* kokonaisuudesta. *ReliefFeature* ja *ReliefComponent* on johdettu *CityObject*-luokasta, jolloin ne perivät kaikki *CityObject*-luokan ominaisuudet ja yhteydet. *ReliefFeature*-luokka tukee maastomallin eri esitysmuotoja, kuten säännöllistä rasteria tai hilarakennetta, kolmioverkkoa, taiteviivoja ja massapisteitä. Nämä neljä eri esitystapaa toteutetaan vastaavilla GML3-kielestä löytyvillä luokilla, joita ovat hila-alkioiden tapauksessa *gml:RectifiedGridCoverage*, taiteviivojen yhteydessä *gml:MultiCurve*, massapisteitä kuvatessa *gml:MultiPoint* ja kolmioverkon tapauksessa joko *gml:TriangulatedSurface* tai *gml:Tin*. (OGC, 2012.)

CityGML-mallissa voidaan yhdistellä kaikkia neljää eri maaston esitysmuotoa, mikä tekee mallista todella joustavan ja monipuolisen. Maastomalli voidaan esittää esimerkiksi rasterien ja taiteviivojen yhdistelmänä tai kolmioverkon ja taiteviivojen kombinaationa. Lisäksi CityGML-tietomallissa maanpintaa voidaan kuvata eri esitysmuodoilla, jotka on rajoitettu

tietylle alueelle eli jokaisen maanpinnan esitysmuodon ulottuvuus on tarkasti määritetty polygoneilla, joissa voi olla myös reikiä. Tämä mahdollistaa maaston mallintamisen karkealla tarkkuustasolla, mutta myös paikoittain erittäin yksityiskohtaisen mallintamisen. Maastomallin tarkkuustasojen ei siis välttämättä tarvitse olla vastaavia kuin muiden CityGML-mallin laajennusmoduulien tarkkuustasojen. Esimerkiksi maastomalli voidaan kuvata karkealla tarkkuudella tai resoluutiolla silloin, kun rakennukset esitetään erittäin yksityiskohtaisesti ja tarkasti. Yhtenäisen ja eheän kokonaisuuden luomiseen käytetään CityGML-tietomallin *TerrainIntersectionCurves* (TIC) -toimintoa, joka mahdollistaa eri kohdetyyppien, kuten rakennusten, siltojen ja katukalusteiden, saumattoman liittämisen digitaaliseen maastomalliin. Toiminnon avulla 3D-kohteet eivät uppoa maastomalliin tai kellu mallin päällä, vaan kohteet saadaan yhdistettyä tarkasti siihen paikkaan, jossa kohde koskettaa maanpintaa. (OGC, 2012.)

### 2.3.6 Kasvillisuus-moduuli

CityGML-tietomallin rakennus- ja maanpinta-moduulien lisäksi voidaan lisätä tietomalliin muitakin kohdetyyppejä laajennusmoduulien avulla. CityGML-tietomallissa olennaisimpiin kohdetyyppeihin kuuluvat rakennukset ja maanpinta, mutta myös kasvillisuus. Kasvillisuuskohteet ovat tärkeä osa 3D-kaupunkimallia, sillä ne auttavat hahmottamaan ympäristöä paremmin. Tietomallin kasvillisuuskohteita analysoimalla ja visualisoimalla saadaan tietoa kasvillisuuden rakenteesta, levinneisyydestä ja monimuotoisuudesta. Pelkästään jo kasvillisuusmallia voidaan hyödyntää pohjamallina simulaatioissa, kuten metsäpalo-, kaupunki- tai mikroilmastosimulaatioissa. Kasvillisuusmallia voidaan käyttää myös muun muassa metsätuhojen tutkimiseen, esteiden havaitsemiseen ja ympäristönsuojeluun liittyvien analyysien suorittamiseen. (OGC, 2012.)

*Vegetation*-moduulilla mallinnetaan kasvillisuuden alaa, volyymia ja yksittäisiä kasvillisuuden kohteita sekä luokitellaan kasvillisuuskohteet ominaisuuksien mukaan luokkiin. *Vegetation*-moduuli mahdollistaa sekä yksittäisten kasvien, kuten puiden, että aluemaisen kasvillisuuden, kuten metsien, niittyjen ja muiden samankaltaisten kasvien muodostamien kokonaisuuksien, lisäämisen CityGML-tietomalliin. *Vegetation*-moduuli erottaa aluemaiset ja yksittäiset kasvillisuuskohteet toisistaan. Yksittäiset kasvillisuuskohteet mallinnetaan luokalla *SolitaryVegetationObject*, kun taas aluemaiset kohteet käyttää luokkaa *PlantCover*. Kasvillisuuskohteita voidaan myös mallintaa prototyyppimalleilla, joiden geometriaa käytetään uudelleen tai joihin viitataan aina silloin, kun vastaavat ominaisuudet esiintyvät tietomallissa. *PlantCover*-luokan geometrisen esityksen ominaisuus voi olla joko *MultiSurface* tai *MultiSolid* riippuen kasvillisuuden korkeudesta, esimerkiksi paremmin kuvaava geometriaesitys metsille on *MultiSolid*-ominaisuus. Yksittäistä kasvillisuuskohdetta kuvaava *SolitaryVegetationObject*-kohde voi saada ominaisuustietoja, kuten luokka, toiminto, käyttö, lajin korkeus, rungon ja latvan halkaisijamitat. *SolitaryVegetationObject*-kohteen luokka-attribuutti sisältää luokittelun kohteiden ja kasvityyppien välillä, kuten puu, pensas ja ruoho. Laji-attribuutti määrittelee kasvillisuuslajin nimen, joka voi luokka-attribuutin tavoin esiintyä korkeintaan kerran. (OGC, 2012.)

Aluemaisia kasvillisuuskohteita mallintava *PlantCover*-kohde voi saada attribuutteja, kuten luokka, toiminto, käyttö ja keskimääräinen korkeus. Luokka-attribuutti kuvaa tietyn kasviyhdyskunnan muodostamien eri kasvilajien esiintymismäärää, minkä vuoksi aluemaista kasvillisuuskohdetta ei mallinneta vain yhdellä kasvilajilla tai -tyypillä. *PlantCover*-kohteen

määrittämä alue täytetään automaattisesti kohdetta vastaavalla satunnaisella useiden kolmiulotteisten kasvi-objektien yhdistelmällä. Tällaista useiden eri kasvilajien ja -tyyppien muodostamaa yhdistelmää voidaan erityisesti käyttää tuottamaan realistinen visualisointi 3D-kaupunkimalliin. (OGC, 2012.)

## **2.4 Rakennusten ja infrarakenteiden tietomallintaminen**

Rakennuksen tietomallinnuksessa (BIM, Building Information Modelling) rakennus ja sen kaikki rakennusprosessin aikaiset tiedot ovat digitaalisessa muodossa. Rakentamisen ja kiinteistönpidon tiedonsiirtomuoto IFC (Industry Foundation Classes) on avoin ohjelmistosta riippumaton kansainvälinen standardi tietomallien kuvaukseen ja siirtoon eri ohjelmistojen välillä. IFC-tietomallilla kuvataan rakennusten rakenteiden tarkkoja yksityiskohtia, kuten palkkeja, seinien paksuuksia, ilmastointiputkia ja käytettyjä materiaaleja. Suomessa rakennusalalla IFC-tietomalli on vakiintunut käytäntö rakennusten tietomallinnuksessa (Helsingin kaupunki, 2016).

Kairos Future et al. (2011) mukaan rakennusten tietomallinnuksella saadaan edistettyä rakennusten suunnittelutyötä huomattavasti, mikä on mahdollista teknologian kehityksen ja tietomallinnusohjelmistojen myötä. Tietomallinnusohjelmistot tekevät mahdolliseksi kompleksisenkin kolmiulotteisen kohteen mallintamisen sekä tehokkaan tiedonhallinnan koko rakennusurakan elinkaaren aikana. Rakennuksen eri elinkaaren vaiheet käsittävät rakennuksen niin suunnittelun, rakentamisen, ylläpidon kuin purkamisen aikaiset tiedot. Tietomallinnus nähdään seuraavana loogisena askeleena, joka syrjäyttää täysin perinteisen 2D- tai 3D-CAD-mallinnustyön. (Kairos Future et al., 2011.)

BIM on tietorakenteena paljon muutakin kuin pelkkä 3D-malli. Kairos Future et al. (2011) mukaan BIM on pikemmin 5D-malli, jonka neljäs ulottuvuus merkitsee aikaa ja viides kustannuksia. Tietomallinnuksella saavutetaan selkeitä hyötyjä, esimerkiksi projektien keston lyhenemisen vuoksi energiankulutus ja haitalliset ympäristövaikutukset pienenevät, jätteen määrä vähenee sekä kustannukset laskevat. Rakennusten tietomallinnuksesta saadaan suurin potentiaalinen hyöty vain, jos kaikki tekevät asioita uudella tavalla ja käyttävät tietomallinusta koko projektin elinkaaren aikana. (Kairos Future et al., 2011.)

Rakennetun ympäristön infrastruktuurin tietomallintamisesta käytetään englanninkielistä lyhennettä InfraBIM (Infra Built Environment Information Model), jolla tarkoitetaan rakennettujen infrakohteiden tietomalleja. Inframallien tietomalleja voidaan tuottaa niin katu-, tie- ja rautatiealueista, silloista kuin tunneleista. Inframalli voi kattaa kohteen eri elinkaaren vaiheiden aikaisia tietomalleja, kuten kohteen suunnittelumallin, toteutusmallin ja toteutumamallin. Infrarakenteita ja niihin liittyviä asioita, kuten rakennusprosessia, kuvaavat tiedot on tallennettu tietyn standardin mukaiseen muotoon, jotta tietomallien yhteiskäyttö ja käyttäminen eri sovelluksissa on mahdollisimman vaivatonta. (BuildingSMART Finland, 2015.)

Niin rakennusten kuin muiden rakennettavien infrakohteiden tietomallintaminen vähentää ihmisten tekemiä virheitä, jolloin työn laatu paranee ja tuottavuus nousee. Tietomalleilla pystytään myös suorittamaan simulaatioita ja analyyseja, joihin ei kyetä perinteisillä geometriamalleilla ja joilla voidaan toteuttaa innovatiivista sekä entistä tehokkaampaa suunnittelutyötä. Tietomallinnuksella ei pelkästään tehdä asioita paremmin –vaan tehdään parempia asioita (Kairos Future et al., 2011).

### 3 Kaupunkimallinnusprojektien tausta

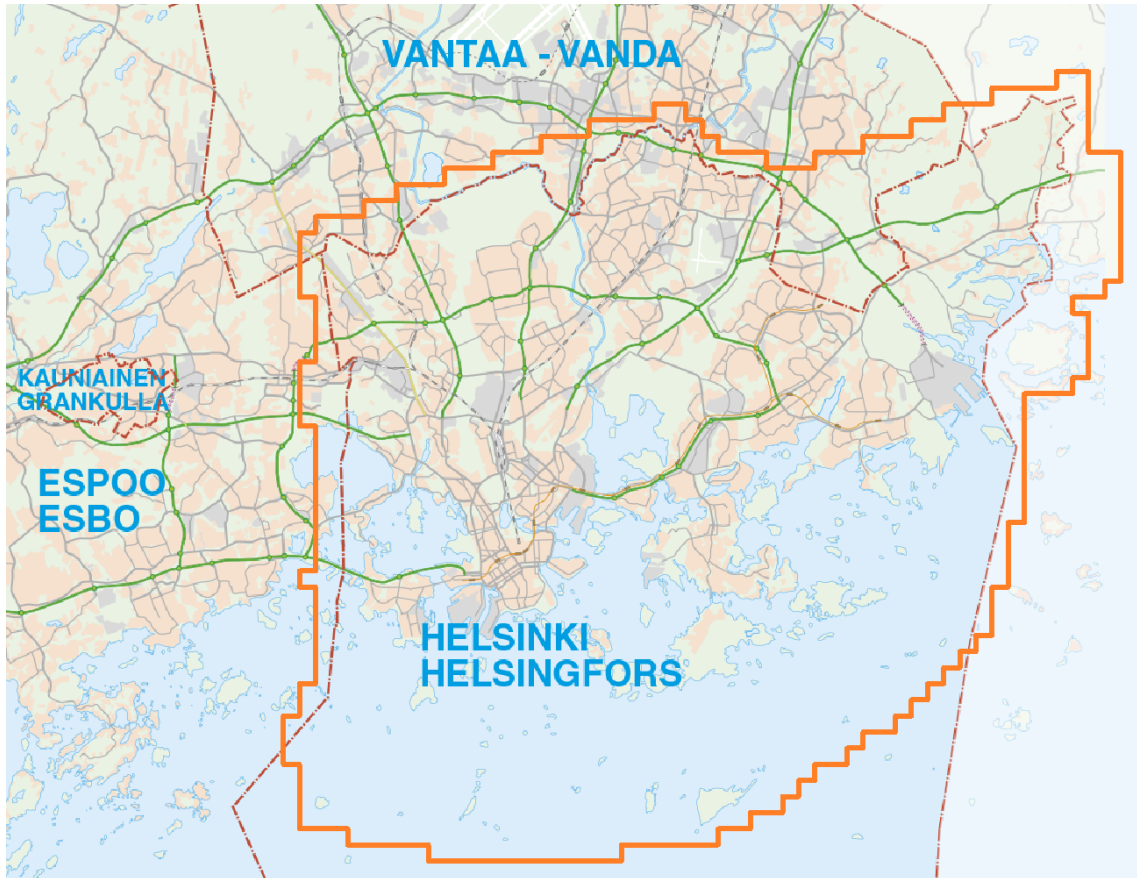
1980-luvulla Helsingissä mallinnettiin rakennuksia ensimmäistä kertaa kolmiulotteisesti. Mallinnustyö oli lähinnä manuaalista ja kustannustehotonta aina vuosituhannen vaihteeseen asti. (Helsingin kaupunki, 2016.) 2000-luvulla tapahtunut voimakas teknologian kehitys niin mittaustekniikassa, laserkeilauksessa, pistepilvien käsittelyssä, viistoilmakuvauksessa, tietojenkäsittelyssä kuin puoliautomaattisessa 3D-mallinnuksessa ovat osaltaan mahdollistaneet kaupunkimallinnuksen kehityksen. Lisäksi Open Geospatial Consortiumin (OGC) kehittämä CityGML-standardi kaupunkitietomallinnukseen ja lähes automaattiset 3D-mallinnussovellukset muuttivat kaupunkimallinnuksen entistä monipuolisemmaksi ja taloudellisemmaksi.

Tässä työssä on kuvattu kahden kaupunkimallin tuotantoprojektit, joissa työn tekijä on ollut mukana. Vuonna 2016 Helsingin kaupungin 3D-tietomallihankkeessa tuotettiin kaksi koko Helsingin kattavaa 3D-kaupunkimallia: fotorealistinen kolmioverkkomalli ja semanttinen CityGML-kaupunkitietomalli. Helsingin 3D-kaupunkimallit on tuotettu uusimmilla mitaus-, 3D-mallinnus- ja tietomallinnusmenetelmillä, joita on kehitetty viimeisen vuosikymmenen aikana. Helsingin 3D-tietomallihankkeen alkuperäisenä tavoitteena oli tuottaa ainoastaan semanttinen CityGML-kaupunkitietomalli, mutta uusi tekniikka mahdollisti kolmioverkkomallin kustannustehokkaan tuottamisen.

Tähän työhön on dokumentoitu sekä kolmioverkkomallin että CityGML-tietomallin tuotantoprojektit. Työssä on esitelty kolmioverkkomallin tuotantoprojekti yksityiskohtaisemmin kuin CityGML-tietomallin tuotantoprojekti. Ulkopuolisilta tahoilta tilatuista tuotantoprojektien osavaiheiden työsuorituksista ei ole yksityiskohtaista tietoa.

Kolmioverkkomalli on geometrinen kaupunkimalli sisältäen graafista ja geometrista tietoa. Kolmioverkkomallia kutsutaan myös mesh-malliksi. Kolmioverkkomallin lähtötietoaineistona toimivat pääasiassa useat osittain päällekkäiset valokuvat mallinnettavasta kohteesta, minkä vuoksi voidaan puhua myös fotogrammetrisesta tai fotorealistisesta mallista. Fotorealistinen kolmioverkkomalli kattaa koko Helsingin, mutta myös alueita Espoosta, Sipoosta ja Vantaalta. Kolmioverkkomallin maantieteellinen alue esitetään oranssin värisenä rajauksena kuvassa 18. Mallin keskeisin lähtötietoaineisto eli ilmapalokuvat ovat peräisin vuoden 2015 kesältä.





**Kuva 18** Kaupunkimallien aluerajaukset: kolmioverkkomallin laajuus on esitetty oranssin värisenä aluerajauksena ja CityGML-tietomallin rajausta määräätyy Helsingin kaupunginrajan mukaan.

Kolmioverkkomallin tuotantoprojekti voidaan jakaa valmisteleisiin töihin ja tuotannollisiin toimiin, joista jälkimmäinen osuus teetettiin ulkopuolisella taholla. Tuotannolliset toimet piti sisällään varsinaisen kolmioverkkomallin rekonstruoinnin ContextCapture-nimisellä sovelluksella. ContextCapture-sovelluksella suoritettua varsinaisen kolmioverkkomallin laskennan operoi ulkopuolinen taho, mutta myös Helsingin kaupungin 3D-tietomallihankkeella oli käytössä kyseinen sovellus erinäisten 3D-mallien rekonstruointia ja testausta varten. Työn tekijä rekonstruoi ContextCapture-sovelluksella lukuisia testimalleja käyttäen samaa kesän 2015 ilmavalokuva-aineistoa.

Semanttiset kaupunkitietomallit soveltuvat semantiikan sekä ominaisuustietojen vuoksi kaupungista kertoviin analyyseihin sekä kaupunkisuunnitteluun kehitysalustaksi. Semanttisten CityGML-tietomallien avulla saadaan suurin potentiaalinen hyöty valjastettua moniin eri käyttötarkoituksiin. (Helsingin kaupunki, 2016.) CityGML-kaupunkitietomallin kattava maantieteellinen alue on koko Helsingin kattava alue, joka on pinta-alaltaan noin 402 km<sup>2</sup> ja joka näkyy kuvassa 18. CityGML-tietomallin tuotantoprojekti käsittää mallista löytyvien CityGML-muotoisten rakennusten ja maanpintamallin tuottamiseen liittyvät vaiheet. Mallia varten kerätty keskeisin lähtötietoaineisto on peräisin vuodelta 2015.

Helsingin 3D-tietomallihankkeessa päämääränä oli toteuttaa 3D-kaupunkimallit koko Helsingin alueesta ja oli osoittaa mallien monipuoliset mahdollisuudet useilla pilottiprojekteilla.

Helsingin kaupunki lanseerasi joulukuussa 2016 kaksi koko Helsingin kattavaa kolmiulotteista kaupunkimallia: fotorealistisen kolmioverkkomallin ja semanttisen CityGML-kaupunkitietomallin. Molemmat kaupunkimallit ovat avointa dataa.

## 4 Kolmioverkkomallin tuotantoprojekti

Kolmioverkkomalli eli yhdenlainen mesh-malli tarkoittaa kolmioverkosta rakennettua mallia. Itsessään mesh tarkoittaa geometrisen mallin esitystapaa, joka voidaan toteuttaa joko kolmioiden, neliöiden tai monikulmioiden muodostaman yhtenäisen verkon avulla. Kolmioverkko muodostuu kolmioiden tasopinnoista, jotka puolestaan koostuvat kolmioiden tahkoista ja kärkipisteistä. Jokaisen tasopinnan kärkipiste kuuluu myös viereiselle tasopinnalle, jolloin koko kolmioverkko luo yhden yhtenäisen pinnan. Kolmioverkkomalli on approksimaatio todellisen kohteen muodosta tietyllä tarkkuudella. Kolmioverkkomallin muodon tarkkuus riippuukin kolmioverkon tiheydestä ja siten myös kolmioiden koosta. Mitä pienemmistä kolmioista malli koostuu, sitä tarkemmasta mallista on kyse. Hyvin tarkan mallin tuottaminen tosin vaatii tietokoneelta runsaasti laskentatehoa.

Tyypillisesti kolmioverkkomalleja käytetään eri mallintamisohjelmissa mallinnettavan kohteen muotojen luomiseen ja esittämiseen. Kolmioverkkomalleja hyödynnetään yleensä myös silloin, kun on tarve visualisoida kohdetta tai tuottaa pohjamalli kohteen suunnitteluprosessiin. Kaupungista tuotettua kolmioverkkomallia sanotaan geometriseksi kaupunkimalliksi, joka sisältää pelkästään graafista ja geometrista tietoa. Kolmioverkkomallin rekonstruoinnissa lähtötietoaineistona toimivat pääasiassa useat osittain päällekkäiset valokuvat mallinnettavasta kohteesta, minkä vuoksi voidaan puhua sekä fotogrammetrisestä että fotorealistisesta mallista.

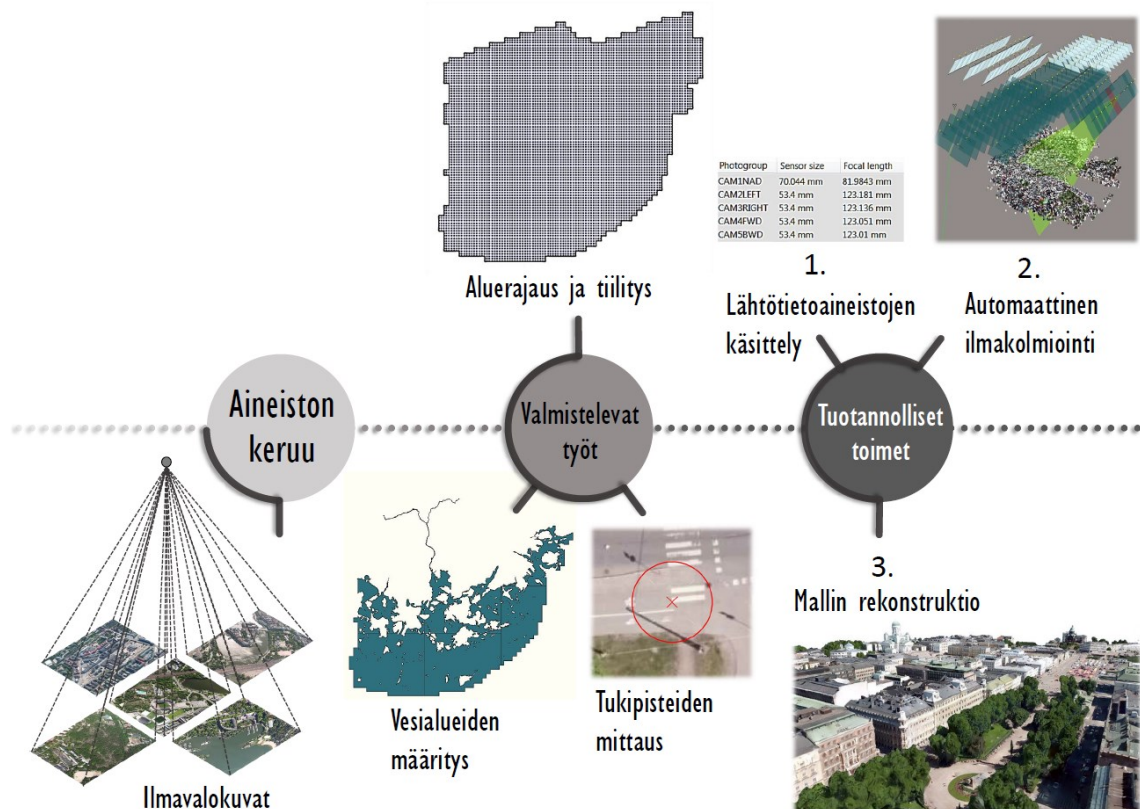
Kokonaisen kaupungin 3D-mallinnus vaatii paljon resursseja grafiikkaprosessoreilta. Tämän vuoksi koko Helsingin kattavan kolmioverkkomallin tuotanto-osuus ContextCapture-sovelluksella ulkoistettiin. Keväällä 2016 Helsingin 3D-tietomallihankkeen yhteydessä tehtiin tilaus kolmioverkkomallin tuotannosta. Tuottajaksi valikoitui Acute3D, joka on ollut tammi-kuusta 2015 lähtien Bentley Systemsin omistama ohjelmistoyritys ja joka on alkujaan kehittänyt ContextCapture-sovelluksen reaaliaikaisen kolmiulotteisen mallintamiseen. Kolmioverkkomallin varsinainen tuotanto ContextCapture-sovelluksella tapahtui Acute3D:n toimipisteellä Pariisissa.

ContextCapture-sovelluksella voidaan muodostaa kuvista lähes automaattisesti fotogrammetrisia kolmiulotteisia pintamalleja. ContextCapture-sovellukseen syötetään lähtötietoina staattisista näkymistä tai kohteista pääasiassa kuvasarjoja, jotka sovellus rekonstruoi teksturoiduksi kolmioverkoksi. Korkearesoluutioisten valokuvien ja/tai lukumäärältään useiden valokuvien käsittely on sekä aikaa vievää että runsaasti laskentatehoa vaativaa. (Bentley Systems, 2016.)

ContextCapture-sovelluksella mallinnettavan kaupungin lähtötietoina toimivat muun muassa ilmavalokuvat ja niiden orientointien tiedot. Ilmavalokuvien pituuspeiton tulee olla vähintään 80 % ja sivupeiton 50 %, jotta saman kohteen yksityiskohdat havaitaan usealla eri kuvalla. Rakennusten julkisivujen ja kapeiden katujen 3D-mallinnus saavutetaan parhaiten ilmavalokuvilla, jotka on kerätty sekä pysty- että viistoilmakuvauksen avulla. Merkittävimmän lähtötietoaineiston eli valokuvien tarkkuus on suoraan verrannollinen tuotetun kolmioverkkomallin tarkkuuteen. Mallin laskenta perustuu kuvilta automaattisesti löydettyjen vastinpisteiden tiheyteen ja mahdollisesti manuaalisesti määritettyjen liitospisteiden tiheyteen. (Bentley Systems, 2016.) Mitä harvempi vastinpisteiden muodostama pistepilvi on, sitä

pidempi on kolmioverkon kolmioiden tahkojen pituus, mikä aiheuttaa 3D-mallin tarkkuuden huonontumista.

Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin vaiheet esitetään kuvassa 19. Mallin tuotantoprojekti alkaa merkittävimmän lähtötietoaineiston keruulla, joka käsittää ilmakuvauksella hankittuja pysty- ja viistoilmakuvia. Kaupungin laajuinen kolmioverkkomalli tuotetaan pääasiassa pysty- ja viistoilmakuvista. Kesällä 2015 suoritettiin koko Helsingin kattava pysty- ja viistoilmakuvaus, jonka prosessi on selostettuna luvussa 5.1.1. Ilmavalokuvia oli varsin johdonmukaista ja järkevää hyödyntää CityGML-tietomallin teksturoinnin lisäksi toisen kaupunkimallin eli geometrisen kaupunkimallin tuottamisessa.



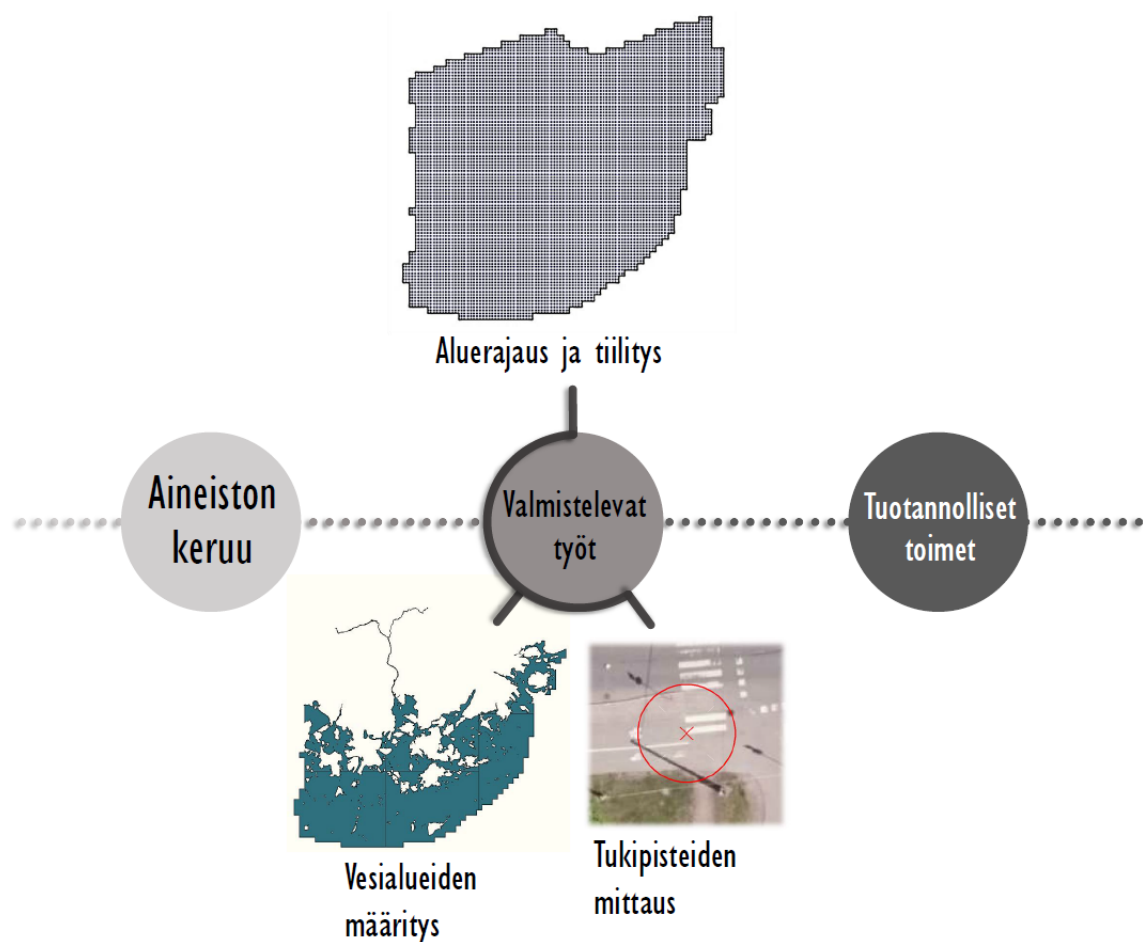
**Kuva 19** Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin vaiheet: aineiston keruu, valmistelevat työt ja tuotannolliset toimet.

Lähtötietoaineiston keruun jälkeen alkavat valmistelevat työt, jotka käsittävät 3D-mallinnuksessa ilmavalokuvien lisäksi käytettävien muiden lähtötietoaineistojen määrittämisen ja muokkaamisen. ContextCapture-sovelluksella kolmioverkkomallin tuottamisen lähtötietoina käytetään myös muun muassa tukipisteitä, mallinnettavan alueen rajausta ja vesialueita määrittäviä polygoneja. Valmistelevien töiden jälkeen siirrytään kolmioverkkomallin tuotantoprojektissa tuotannollisiin toimiin. Tuotannolliset toimet pitävät sisällään kaikki ContextCapture-sovelluksella käyttäjän suorittamat työvaiheet varsinaisen kolmioverkkomallin tuottamiseksi.

Kolmioverkkomallin tuotantoon liittyviä tahoja ovat mallin tilaaja, joka toimittaa tuottajalle lähtötietoaineiston, ja mallin tuottaja, joka prosessoi aineiston laitteistollaan ja toimittaa asiakkaalle lopputuotteen määritetyissä tiedostomuodoissa. Kolmioverkkomallin tuotannon työnkulku voidaan jakaa valmisteleviin töihin ja tuotannollisiin toimiin, joista ensiksi mainittu on suurilta osin tilaajan vastuulla ja jälkimmäisessä vastuu on lähinnä tuottajalla.

#### 4.1 Valmistelevat työt

Valmistelevat työt pitävät sisällään kolmioverkkomallin tuottamiseen tarvittavien lähtötietoaineistojen määrittämisen ja muokkauksen. Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin valmistelevat työt on havainnollistettu kuvassa 20. Lisäksi valmistelevisissä töissä tilaajan tulee määrittellä erinäisiä ominaisuuksia lopputuotteelle ja toimittaa lähtötietoaineistot mallin tuottajalle. Lopputuotteen ominaisuuksilla tarkoitetaan tuotettavan 3D-mallin tiedostomuotoa ja valmiin kolmioverkkomallin muita ominaisuuksia, kuten tiilitystä.



**Kuva 20** Kolmioverkkomallin tuotantoa varten suoritettavat valmistelevat työt.

Valmistelevat työt pitävät sisällään mallinnettavan alueen rajauksen ja sen tiilityksen määrittämisen sekä tukipisteiden mittauksen ja mallin alueelle osuvien vesialueiden määrittämisen. Tiilityksellä tarkoitetaan tekniikkaa, jolla 3D-mallinnettava alue jaetaan vierekkäisiin paloihin.

#### **4.1.1 Aluerajaus ja tiilitys**

Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin valmistelevissa töissä määritettiin ensinnäkin mallinnettavan alueen aluerajaus, joka kattoi koko Helsingin, mutta myös alueita Espoosta, Siipoosta ja Vantaalta. Aluerajaus näkyy kuvassa 18. ContextCapture-sovellus tuottaa aluerajauksen avulla 3D-mallin vain rajauksen sisäpuolella olevasta alueesta. Täten aluerajauksen avulla saadaan tuotettavalle 3D-mallille selkeät mallin ulkorajat. Aluerajaus pyrittiin määrittämään mahdollisimman laajaksi olemassa olevien ilmavalokuvien puitteissa, minkä vuoksi aluerajaus oli määrittelyiltään sama kuin ilmavalokuvattu alue. Kun tuotettava kolmioverkkomalli kattaa Helsingin kaupungin lisäksi naapurikaupungin maata kaupunginrajan välittömässä läheisyydessä, pystytään mallia hyödyntämään myös aivan kaupunginrajalle osuvissa suunnitteluhankkeissa.

ContextCapture-sovelluksella voidaan tuottaa kokonaisten kaupunkien kattavia 3D-malleja. Tällöin grafiikkaprosessorien laskentateho tai tietokoneen muisti ei välttämättä riitä käsittelemään kerrallaan kokonaisen kaupungin kattavaa rekonstruktiota, vaan mallinnettava alue on syytä jakaa osa-alueisiin, jotka rekonstruoidaan yksi kerrallaan. Kolmioverkkomallin optimaalisen prosessoinnin takaamiseksi tiilen kannan pituus saa olla maksimissaan 250 m. Liian suuri tiilen koko vaikeuttaa kolmioverkkomallin renderöintiä esimerkiksi verkkojakelupalveluissa. Kolmioverkkomalli jaettiin tiiliksi Helsingin kaupungin 250 m x 250 m -lehtijaon perusteella. Tämän lehtijaon käyttämisen yhtenä hyvänä puolena on sen yhteensopivuus jo olemassa olevien kartta-aineistojen kanssa. 3D-mallin osa-alueiden indeksointi lehtijaon mukaisesti helpottaa mallin käyttämistä, kun tietty mallin osa-alue pystytään paikantamaan lehtijaon perusteella.

Mallinnettavan alueen aluerajauksen sisällä olevat osa-alueet tiilitettiin ja identifioitiin lehtijaon mukaisesti. Mikäli jokin tiili tai vain osa tiilestä osuu aluerajauksen sisälle, kuuluu se rekonstruoitavaan alueeseen. ContextCapture-sovellus rekonstruoii tiilityksen mukaan osa-alueet yksi kerrallaan. Kolmioverkkomallin yhtenä lähtötietoaineistona olivat 3D-mallin aluerajaus ja alueen tiilitys.

#### **4.1.2 Tukipisteiden mittaus**

Tukipisteiden mittaustilanne on tyypillisesti tärkeä vaihe, jolla on suuri vaikutus lopputuotteen onnistumiselle. Tukipisteiden tarkkuudet korreloivat rekonstruoitavan 3D-mallin tarkkuuden kanssa. Tukipisteiden sijainnit pyritään määrittämään siten, että tukipisteiden kautta muodostettu kolmioverkko kattaisi koko alueen mahdollisimman hyvin sekä sulkisi mallinnettavan alueen kokonaan sisäänsä.

Mikäli ilmakuvat, niiden orientointitiedot sekä kameroiden kalibroinnit pitäisivät täysin paikkaansa, kuvablokin suhteelliseen tarkkuuteen pääsemiseksi riittäisi periaatteessa kolmen tukipisteen määrittäminen koko alueelle. Tämä on kuitenkin kaukana totuudesta, sillä sekä kuvat

että kameroiden kalibroinnit sisältävät aina systemaattisia virheitä. Tämän vuoksi tukipisteitä on määritettävä koko mallin alalta, mikä tarkoittaa tämän tyyppisessä kaupunkimallinnuksessa tukipisteen määrittystä jokaista 15 000–20 000 pikseliä kohti. Ilmakuvien maastoresoluution ollessa noin 10 cm, tulee tukipisteitä määrittää 1,5–2 km välein.

Tukipisteiden mittaus suoritettiin ortokuvien, kantakartan ja luokitellun laserkeilausaineiston avulla. Tukipisteiden sijainnin valikoinnissa käytettiin hyväksi ortokuvalta hyvin erottuvia ja havaittavissa olevia kohteita, kuten valkoisia suojatie- ja muita tiemerkintöjä, rakennusten kattomuotoja sekä kalliokivissä erottuvia uurteita. Tukipisteiden koordinaattien mittaus suoritettiin MicroStation- ja TerraScan-ohjelmistoilla. MicroStation-ohjelmistoa käytettiin kaksikulotteisten kartta- ja kuva-aineistojen käsittelyyn. MicroStation-ohjelmistolla käsiteltiin ETRS-GK25-tasokoordinaatistossa olevia ortokuvia sekä kantakarttaa, joilta mitattiin tukipisteiden tasokoordinaatit. Vastaavasti tukipisteen Z-koordinaatti mitattiin N2000- korkeusjärjestelmässä TerraScan-ohjelmistolla, jolla pystyttiin käsittelemään luokiteltua pistepilveä.

Kantakarttaa hyödynnettiin pääasiassa tukipisteiden sijainnin tarkistuksessa. Kun tukipiste mitattiin ortokuvan avulla kohteeseen, joka oli havaittavissa myös kantakartalla, verrattiin tämän kantakartalle digitoidun kohteen sijaintia suhteessa ortokuvalla näkyvän tukipisteen sijaintiin. Esimerkiksi ortokuvan avulla mitattiin rakennuksen harjakattoon tukipiste, minkä jälkeen tarkastettiin, että kantakartalle digitoidun kyseisen rakennuksen kivijalkavektorin sijainti oli ainakin lähes vastaava kuin ortokuvan rakennuksen sijainti. Luokiteltua pistepilviaineistoa käytettiin hyväksi myös tukipisteiden sijainnin tarkistuksessa. Ortokuvalta mitattujen tukipisteiden sijaintia verrattiin pistepilven avulla mitattujen tukipisteiden sijainteihin. Eri aineistojen avulla pystyttiin vertaamaan ja tarkastamaan tukipisteiden sijainteja sekä mitaamaan lähimpänä todellisuutta olevat koordinaatit.

Tukipisteitä pyrittiin määrittämään kattavasti koko mallinnettavalle alueelle. Tosin alueet, joille ei pystytty mitaamaan näitä tukipisteitä, olivat kauttaaltaan liian homogeenisia, ettei alueelta löytynyt tukipisteiksi mitattavia yksityiskohtia. Tällaisia alueita olivat esimerkiksi vesi- ja kasvillisuusalueet. Tämän tyyppiset alueet aiheuttavat sen, että tukipisteiden määrittämä kolmioverkko muodostuu mahdollisesti liian harvaksi. Suurten vesialueiden, kuten merialueiden, saarille tuli erikseen määrittää kolme tukipistettä, koska itse merialueelle ei pystytty tukipisteitä mitaamaan.

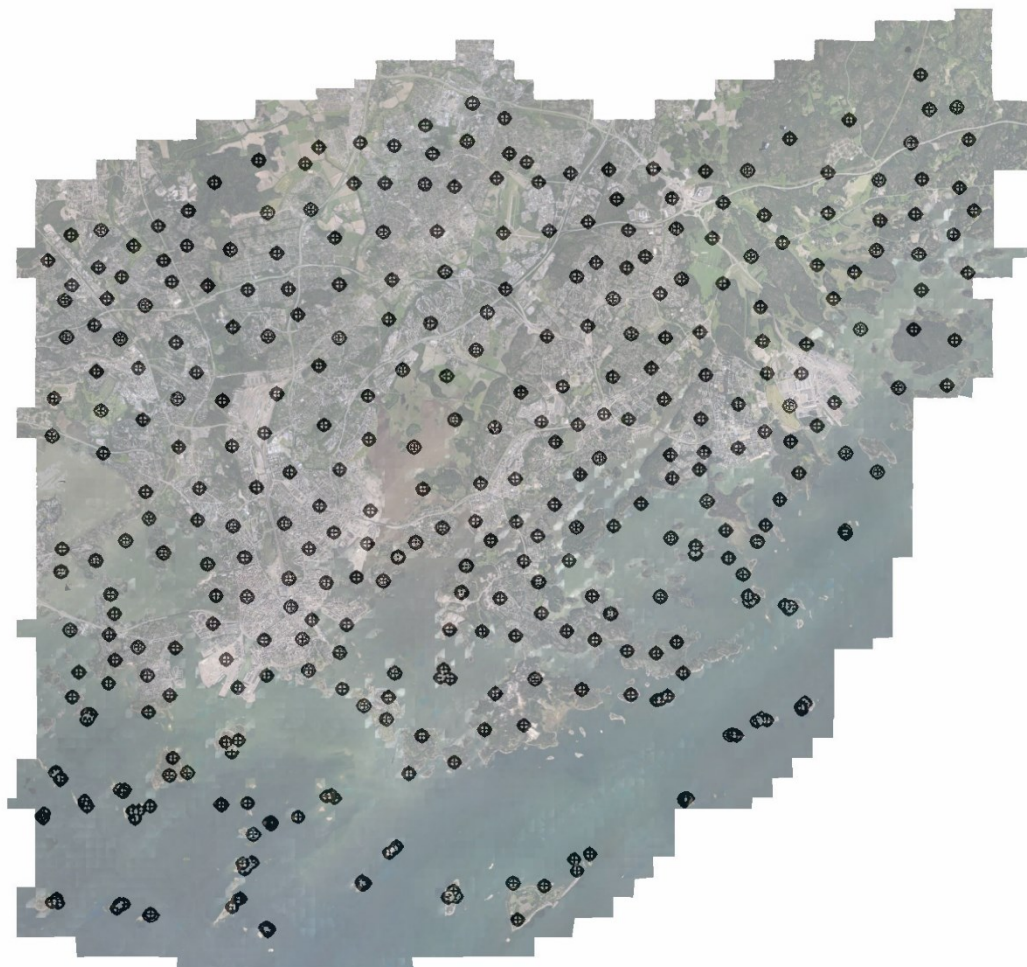
Tukipisteiden mittausprosessi MicroStation- ja TerraScan-ohjelmistoilla eteni pääsääntöisesti seuraavasti: Ensiksi MicroStation-ohjelmistolla etsittiin tukipisteeksi sopiva sijainti, jonka X- ja Y-koordinaatit mitattiin ortokuvan ja kantakartan avulla. Toiseksi mitattiin tukipisteen korkeus luokitellun pistepilven avulla. Terrasolid-yrityksen ohjelmistotuoteryhmään kuuluva TerraScan-ohjelmisto toimii MicroStation-ohjelmiston päällä ja sillä pystytään tarkastelemaan ja käsittelemään laserpisteaineistoja. TerraScan-ohjelmistolla pystytään tarkastelemaan luokiteltuja pistepilviä, kuten maanpinnan tai rakennusten pistepilviaineistoa. Luokittelun avulla pystyttiin ottamaan käsittelyyn kerralla eri pisteluokkia ja siten mitaamaan esimerkiksi rakennusta määrittävän pisteaineiston koordinaatteja.

Tukipisteen taso- ja korkeuskoordinaattien lisäksi mitattiin tukipisteen pikselikoordinaatit ilmavalokuvalta, jolta erottui kulloinkin kyseessä oleva tukipiste. Tukipisteen sijainti etsittiin ilmavalokuvalta ja pikselikoordinaatit kirjattiin ylös.



Tukipisteiden mittausprosessi ei aina noudattanut järjestystä, jossa ensiksi mitattiin taso- ja korkeuskoordinaatit ja toiseksi ilmavalokuvan pikselikoordinaatit. Tukipisteiden määrittäminen aloitettiin toisinaan selaamalla ilmavalokuvia ja etsimällä niistä tukipisteiksi soveltuvia kohtia. Tällöin ensiksi mitattiin tukipisteiden pikselikoordinaatit ja vasta toiseksi mitattiin X-, Y- ja Z-koordinaatit. Tätä järjestystä noudatettiin varsinkin silloin, kun alueella ei ollut paljon vaihtoehtoisia kohtia tukipisteille. Esimerkiksi tukipisteiden, jotka sijaitsivat saarilla, pikselikoordinaatit mitattiin useimmiten ennen taso- ja korkeuskoordinaattien mittausta.

Tukipisteitä määritettiin kattavasti tuotettavan 3D-mallin alueelle. Kuva 21 havainnollistaa kaikkia lähes 400 määritettyä tukipistettä. Tukipisteitä mitattiin myös jokaiselle saarelle kolme kappaletta. Tukipisteitä oli ehdotonta määrittää erikseen jokaiselle saarelle vähintään kolme, joiden avulla voitiin ratkaista yhdenmuotoisuusmuunnoksen muunnosparametrit. Tukipisteiden kohdekoordinaatiston X-, Y- ja Z-koordinaatit sekä kuvakoordinaatiston kuvapikselien x- ja y-pikselikoordinaatit kirjattiin ylös taulukkoon. Taulukkotiedoston sisältämä tukipisteiden informaatiota tarvittiin Acute3D suorittamiin tuotannollisiin toimiin.



**Kuva 21** Tukipisteitä määritettiin kattavasti koko mallinnettavalle alueelle ja mitattiin jokaiselle ulkosaariston saarelle kolme kappaletta.



### 4.1.3 Vesialueiden määrittäminen

Läpinäkyviä, heijastavia tai liikkuvia kohteita ei pystytä mallintamaan oikein ilman erillisten lähtökohtien määrittämistä 3D-mallin rekonstruktioille. Kolmioverkkomallin automaattinen laskenta perustuu vastinpisteiden löytämiseen kuvilta, minkä vuoksi edellä mainittujen kohteiden 3D-mallinnus ei ole mahdollista ilman erillisten lähtökohtien tai kriteerien määrittämistä. Ilmavalokuvilta ei pystytä vangitsemaan informaatiota läpinäkyvistä, heijastavista tai peilaavista kohteista, eikä liikkuvista kohteista löydy vastinpisteitä kuvien päällekkäisiltä osilta.

Kolmioverkkomallin rekonstruoinnissa tulee ottaa huomioon mallinnettavalla alueella olevat vesialueet, joita ei pystytä mallintamaan oikein ilman 3D-mallin rekonstruktioille määritettyjä kriteerejä. Laajojen vesialueiden pinnan fotogrammetrinen 3D-mallinnus yleensä epäonnistuu, koska vesien tekstuuripinnoista ei voi luotettavasti määrittää vastinpisteitä. Samanlaisten piirteiden haku kuvilta siis epäonnistuu, minkä seurauksena 3D-malli rekonstruoituu väärin.

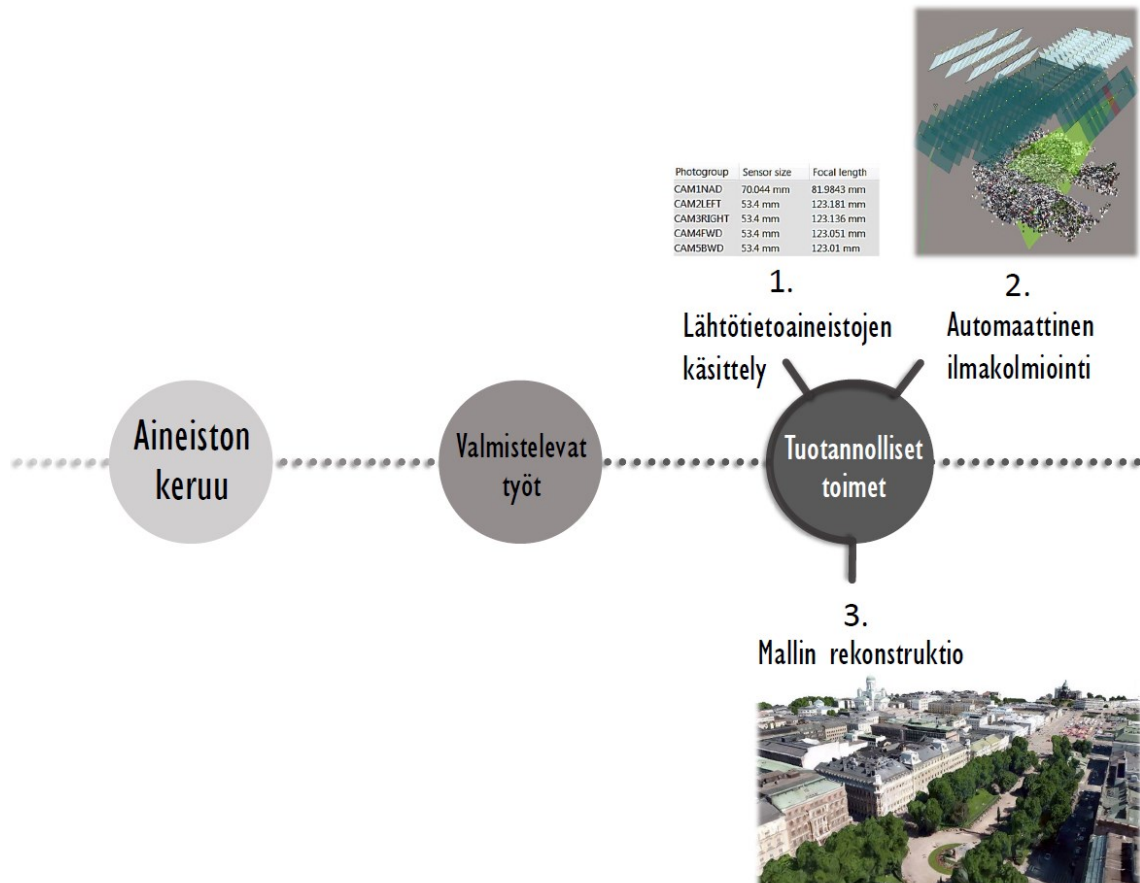
Rekonstruoitavan Helsingin kolmioverkkomallin alueelle osui vesialueista merialuetta ja Vantaanjoki. Merialueen ja Vantaanjoen 3D-mallinnukselle voitiin asettaa erilliset lähtökohdat ja kriteerit, joiden mukaan 3D-mallin rekonstruktio suoritettiin ContextCapture-sovelluksella. 3D-mallin rekonstruktioille määritettävänä rajoituksina toimivat vektoriaineistot, joiden mukaan 3D-mallin pintatasot saadaan tarvittaessa korjattua oikeille tasoille. Vektoriaineistona toimivat esimerkiksi polygonit, jotka rajaavat tietyn alueen sisäänsä ja jotka asetetaan tiettyyn korkeuteen. ContextCapture-sovelluksella vektoriaineistoa käytettäessä, 3D-malli rekonstruoidaan vektoriaineiston mukaan vain, jos kuvilta ei löydy vastinpisteitä. Vektoriaineistot saavat siis kattaa suuremman alueen kuin mallin rekonstruktioille on tarpeen. Toisaalta vektoriaineiston peittäessä liian suuren alueen 3D-mallista, muodostuu siitä tarpeetonta kolmioverkkoa 3D-mallin sisäpuolelle. Toisaalta vektoriaineiston kattaessa liian pienen alueen, 3D-mallin rekonstruktio epäonnistuu.

Helsingin edustalla olevasta merialueesta tuotettiin polygoni, jonka korkeus määritettiin nolatasolle. Merialueen tasokoordinaatit määritettiin sekä kantakartan rantarajaviivan että ortokuva-aineiston avulla. Vantaanjoesta tuotettiin digitaalinen pintamalli, jonka kolmioidun verkon tehtävänä oli ohjata ContextCapture-sovelluksella tapahtuvaa 3D-mallin rekonstruktioita.

## 4.2 Tuotannolliset toimet

ContextCapture-sovelluksella pystytään rekonstruoimaan lähtötietoaineistoista kolmiulotteinen fotogrammetrinen pintamalli. Lähtötietoaineistot pitivät sisällään ilmakuvauksella hankitut pysty- ja viistoilmakuvat parametri- ja orientointitietoineen sekä valmistelevissa töissä tuotetut tietoaineistot. Lähtötietoaineistot käsittivät noin 50 000 ilmavalokuvaa, kuvien ulkoiset orientointitiedot, kameroiden parametri-, kalibrointi- ja orientointitiedot, kolmioverkkomallin aluerajauksen ja tiililyksen, tukipisteitä koskevan informaation, merialuetta määrittävän vektorimuotoisen polygonin ja mallin alueella sijaitsevan joen digitaalisen pintamallin.

Kuvassa 22 esitetään kolmioverkkomallin tuotantoprojektin tuotannollisten toimien vaiheet. Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin tuotannolliset toimet pitävät sisällään kaikki työvaiheet, jotka sovelluksen operoija suorittaa ContextCapture-sovelluksella 3D-mallin rekonstruoimiseksi. Kolmioverkkomallin tuotannolliset toimet voidaan jakaa kolmeen seuraavaan vaiheeseen: lähtötietoaineistojen käsittely, automaattinen ilmakolmiointi ja mallin rekonstruktio. Mallin tuottaja Acute3D suoritti kaikki ContextCapture-sovelluksella tehtävät kolmioverkkomallin käsittely- ja tuotanto-osuudet.



**Kuva 22** ContextCapture-sovelluksella suoritettavien tuotannollisten toimien vaiheet kolmioverkkomallin rekonstruoimiseksi.

ContextCapture-sovellus käsittää kaksi moduulia: ContextCapture Master- ja ContextCapture Engine -moduulit. ContextCapture Master on sovelluksen pääkäyttöliittymä, joka toimii graafisena käyttöliittymänä lähtötietojen ja asetusten määrittämisessä. Master-moduulia käytetään muun muassa 3D-mallinnukseen liittyvien prosessien käynnistämiseen, näiden prosessien edistymisen seuraamiseen ja tulosten visualisoimiseen. Master-moduuli hallinnoi alusta loppuun saakka koko 3D-mallinnusprosessia, jonka työvaiheita ovat projektin luonti, blokkien hallinnointi ja rekonstruktio. Master-moduuli ei käsittele itse prosessointia vaan ContextCapture Engine -moduuli suorittaa prosessoinnin tausta-ajona ilman käyttäjän puuttumista prosessointiin. Center-moduuli suorittaa ilmakolmioinnin ja 3D-mallin rekonstruoinnin useiden algoritmien avulla. (Bentley Systems, 2016.)

#### 4.2.1 Lähtötietoaineistojen käsittely

ContextCapture-sovellukseen luodaan yleensä uusi projekti jokaisesta uudesta kolmioverkko-mallin tuotantoprojektista. Kukin projekti pitää sisällään kaiken olennaisen tiedon mallin tuotannosta. Projektiin voidaan lukea sisään yhden kuvablokin lisäksi useita kuvablokkeja. Kuvablokki tarkoittaa lähtötietoaineistona annettuja valokuvia sekä tietoja valokuvien ominaisuuksista ja kuvausjärjestelmistä, joita ovat muun muassa tieto sensorin koosta, kuvan pääpisteen sijainti sekä tieto optiikan vääristymisistä, asennoista ja kierroista. Kuvablokin paikannus- ja asentohavaintotiedot antavat hyvät lähtöarvot kuvien absoluuttiseen orientointiin, mutta tukipisteiden määrittäminen parantaa lopputulosta.

Mallinnettava alue jaettiin aluksi neljään projektialueeseen optimaalisen prosessoinnin takaamiseksi. Jokaista projektialuetta käsiteltiin omana projektinaan eli kuvablokkinaan ennen lopullisen mallin rekonstruointia. Kuvablokkien alue asetettiin osittain päällekkäin, jotta kuvablokkien yhdistäminen onnistuisi vaivattomasti. Kuvablokkien yhdistäminen onnistuu, mikäli kuvablokit on georeferoitu samaan kohdekoordinaatistoon.

Ensiksi ContextCapture-sovellukseen tuotiin pysty- ja viistoilmakuvat sekä niiden parametri- että orientointitiedot. Sovellus lukee kuvien parametritiedot ja jakaa kuvat automaattisesti kuvaryhmiin, jotka koostuvat samalla kameralla ja samoilla asetuksilla otetuista kuvista. Saman kuvaryhmän kuvat sisältävät samat sisäisen orientoinnin parametrit. Toiseksi sovellukseen luettiin sisään informaatio tukipisteistä. Tukipisteen sijainti etsittiin ilmapalokuvilta ja kohdistettiin oikeaan pikseliin. Tukipisteitä kannattaa merkitä useammalle kuvalle. Mitä tarkemmin tukipisteet on määritetty ja merkitty kuvalle oikeaan pikseliin, sitä onnistuneempi on ilmakolmioinnin lopputulos.

#### 4.2.2 Automaattinen ilmakolmiointi

Automaattinen ilmakolmiointi, toiselta nimeltään sädekimpputasoitus, on yksi kriittisimmistä vaiheista fotogrammetrisessä mallinnuksessa. Nykyään toiminto on vakiona useissa 3D-mallinnussovelluksissa ja toiminnon eri vaiheet ratkaistaan käyttäjältä suljettuina tapahtumina. Tällöin 3D-mallinnussovelluksen käyttäjä ei tarvitse erityisosaamista 3D-mallien rekonstruointia varten ja ei-ammattilaisetkin voivat olla sovellusten potentiaalisia käyttäjiä. (Forlani et al., 2015.)

ContextCapture-sovelluksella voidaan suorittaa kuvablokille automaattinen ilmakolmiointi. Automaattisen ilmakolmioinnin tarkoituksena on ratkaista automaattisilla menetelmillä ja useilla algoritmeilla kuvien keskinäinen orientointi ja sitoa kuvat kohdekoordinaatistoon. Ilmakolmiointi sisältää toimintaketjun, jonka vaiheita ovat kuvablokin muodostus, liitospisteiden valinta, lähtöarvojen määrittäminen vastinpisteille, vastinpisteiden sovitin, sädekimpputasoitus ja kuvien tiheä yhteensovitus.

Ilmakolmioinnissa on tärkeää, että koko kuvablokkia käsitellään yhtäaikaaisesti tasalaatuisen ja yhdenmukaisen mallin aikaansaamiseksi. Ilmapalokuvien paikannus- ja asentotiedot eivät ole riittävän tarkkoja kuvablokin absoluuttisen orientoinnin ratkaisemiseksi, minkä vuoksi kuvablokin kiinnittämisessä kohdekoordinaatistoon käytetään tukipisteitä, jotka toimivat ilmakolmioinnissa likimääräisinä lähtöarvoina. Kuvilta automaattisten menetelmien avulla löydetty vastinpisteet toimivat tukipisteiden ohella kolmioinnin lähtöpisteinä. Tukipisteiden

avulla kuvablokista muodostuva malli saadaan sidottua kohdekoordinaatistoon. Tukipisteiden tarkkuus korreloi georeferoinnin laatua.

Ilmakolmiointi suoritettiin erikseen neljälle kuvablokille, joilla oli päällekkäisiä alueita. Taulukoissa 2–5 esitetään automaattisen ilmakolmioinnin tulokset jokaisen neljän kuvablokin osalta. Ilmakolmioinnin tuloksista havaitaan, että eri kuvablokkien ilmakolmioinneista ei löydy juurikaan eroavaisuuksia. Ennen ilmakolmiointia tukipisteiden lähtöarvojen virhe on noin 1,0 m, josta tukipisteiden korkeusvirhe tuottaa enemmän virhettä kuin tasovirhe. Sädekimpputasoituksessa tukipisteiden lähtöarvojen avulla ratkaistaan lopulliset parametrit, joiden tarkkuus ilmakolmioinnin tulosten perusteella on alle 2 cm. Automaattisesti määritettyjen vastinpisteiden tarkkuus on noin 5 cm.

**Taulukko 2** Kuvablokin 1 ilmakolmioinnin tulokset.

| Before aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                     | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points           | 122              | 4.21                           | 10.81                           | 1.026                        | 1.381                | 0.375                        | 1.329                      |
| Automatic_tie_points     | 0                |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |

| After aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                    | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points          | 122              | 0.10                           | 0.23                            | 0.023                        | 0.026                | 0.023                        | 0.013                      |
| Automatic_tie_points    | 604057           | 0.38                           | 0.58                            | 0.056                        |                      |                              |                            |

**Taulukko 3** Kuvablokin 2 ilmakolmioinnin tulokset.

| Before aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                     | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points           | 105              | 4.72                           | 13.78                           | 1.300                        | 1.507                | 0.437                        | 1.443                      |
| Automatic_tie_points     | 0                |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |

| After aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                    | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points          | 105              | 0.09                           | 0.13                            | 0.013                        | 0.013                | 0.013                        | 0.005                      |
| Automatic_tie_points    | 517451           | 0.39                           | 0.59                            | 0.056                        |                      |                              |                            |

**Taulukko 4** Kuvablokin 3 ilmakolmioinnin tulokset.

| Before aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                     | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points           | 153              | 4.33                           | 10.58                           | 1.014                        | 1.449                | 0.424                        | 1.385                      |
| Automatic_tie_points     | 0                |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |

| After aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                    | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points          | 153              | 0.11                           | 0.19                            | 0.018                        | 0.020                | 0.019                        | 0.006                      |
| Automatic_tie_points    | 543874           | 0.39                           | 0.59                            | 0.056                        |                      |                              |                            |

**Taulukko 5** Kuvablokin 4 ilmakolmioinnin tulokset.

| Before aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                     | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points           | 77               | 4.09                           | 8.67                            | 0.803                        | 1.347                | 0.384                        | 1.291                      |
| Automatic_tie_points     | 0                |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |

| After aerotriangulation |                  |                                |                                 |                              |                      |                              |                            |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Type                    | Number of points | Median reprojection error [px] | RMS of reprojection errors [px] | RMS of distances to rays [m] | RMS of 3D errors [m] | RMS of horizontal errors [m] | RMS of vertical errors [m] |
| Control_points          | 77               | 0.08                           | 0.14                            | 0.013                        | 0.014                | 0.013                        | 0.003                      |
| Automatic_tie_points    | 631986           | 0.37                           | 0.59                            | 0.056                        |                      |                              |                            |

ContextCapture-sovelluksella suoritettava ilmakolmiointi ei ole sovelluksen käyttäjältä riippuvainen vaan automaattisen ilmakolmioinnin eri vaiheet ratkaistaan käyttäjältä suljettuina tapahtumina ContextCapture Engine -moduulissa. 3D-mallinnussovelluksen käyttäjän vastuulle jää erinäisten asetusten määrittely ja muut valmistelevat toimet sekä tukipisteiden mittaaminen kuvilta. Lisäksi käyttäjä arvioi lopputuloksen onnistuneisuutta, tarkkuutta ja laatua. ContextCapture-sovelluksessa voidaan tutkia vastinpistemittaustuloksia suoraan kuvalta, mitä havainnollistetaan kuvalla 23, jossa esitetään ilmakolmioinnin vastinpistemittauksen lopputulosta yhdellä viistoilmakuvalla. Kuvassa näkyvät vihreät neliöt kertovat keltaisia neliöitä onnistuneemmasta vastinpistehavainnon mittauksesta.





**Kuva 23** Yhden viistoilmakuvan vastinpistemittaushavainnot, joita kyseiseltä kuvalta on havaittu lähes tuhat pistettä.

Kuvassa 24 esitetään pystyilmakuva, jolta on tehty vastinpistemittaushavaintoja noin 600 kappaletta. Vastinpisteitä ei kuitenkaan pystytä luotettavasti määrittämään heijastaville, läpikuultaville tai liikkuvilla kohteille, minkä vuoksi esimerkiksi vesialueelta ei pystytä tekemään yhtään vastinpistehavaintoa, kuten kuvasta voidaan huomata. Kuvan vesialueella ei sijaitse yhtäkään vastinpistettä vihreiden tai keltaisten neliöiden muodossa.

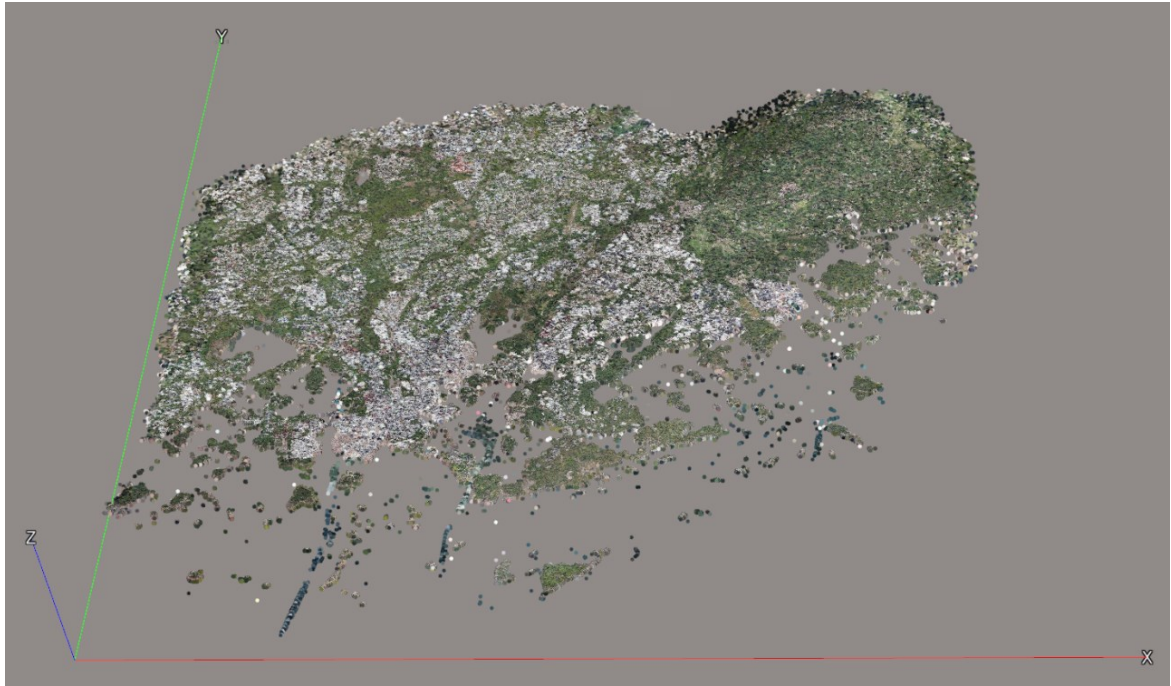


**Kuva 24** Heijastavista ja liikkuvista kohteista ei pystytä määrittämään vastinpisteitä, mikä havaitaan vihreiden ja keltaisten neliöiden eli vastinpisteiden puuttumisena vesialueelta.

#### 4.2.3 Mallin rekonstruktio

Kuvien keskinäisen ja ulkoisen orientointien ratkaisemisen jälkeen voitiin yhdistää neljä kuvablokkia yhdeksi kuvablokiksi. Kuvablokkien yhdistäminen onnistuu, mikäli kuvablokit on georeferoitu samaan kohdekoordinaatistoon. Kuva 25 havainnollistaa yhdistettyjen kuvablokkien vastinpistehavaintoja, jotka kattavat koko rekonstruoitavan maa-alueen. Vastinpistehavainnot kattavat pelkästään maa-alueen, koska vesialueille ei pystytä havaitsemaan vastinpisteitä kuvien päällekkäisiltä osilta. Vesialueille ei pystytä luotettavasti määrittämään kuvien päällekkäisiltä osilta yhteisiä piirteitä.

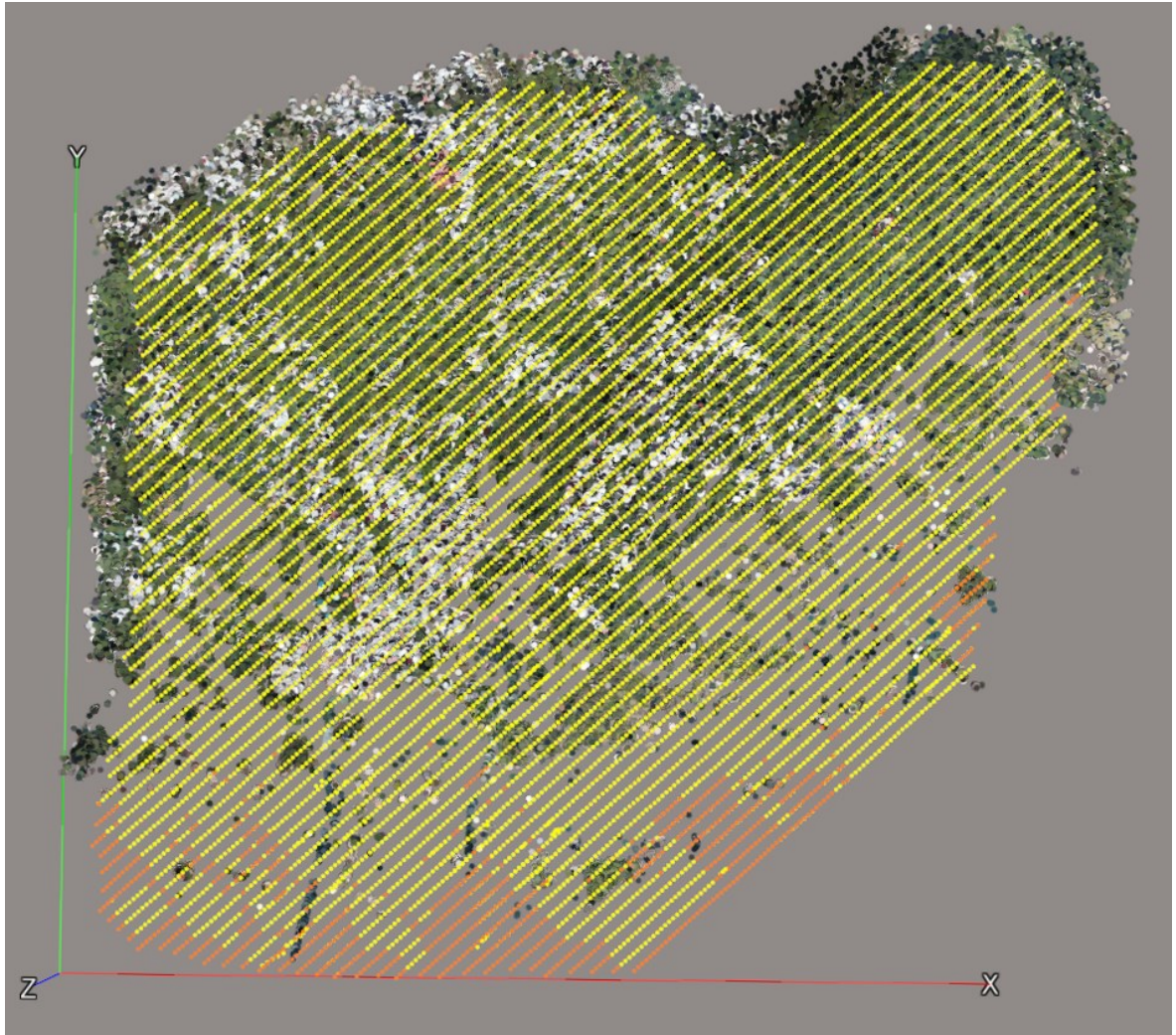




**Kuva 25** Ilmakolmiointivaiheessa tuotetut vastinpistehavainnot kattavat koko rekonstruoitavan maa-alueen.

Kuvablokkien yhdistämisen jälkeen voitiin tarkastella kaikkien ilmavalokuvien sijoittumista toisiinsa. Kuvassa 26 esitetään keltaisella ja oranssilla värillä ilmavalokuvien kuvanottoaikojen sijainnit, joiden alapuolella havaitaan vastinpistehavainnot koko rekonstruoitavalta maa-alueelta. Kuvassa näkyvät keltaisen väriset symbolit merkitsevät niitä ilmavalokuvia, joilta vastinpistehavaintoja on tehty. Oranssit symbolit kuvaavat ilmavalokuvia, joilta ei löydetty yhtään vastinpistettä automaattisessa ilmakolmiointissa.





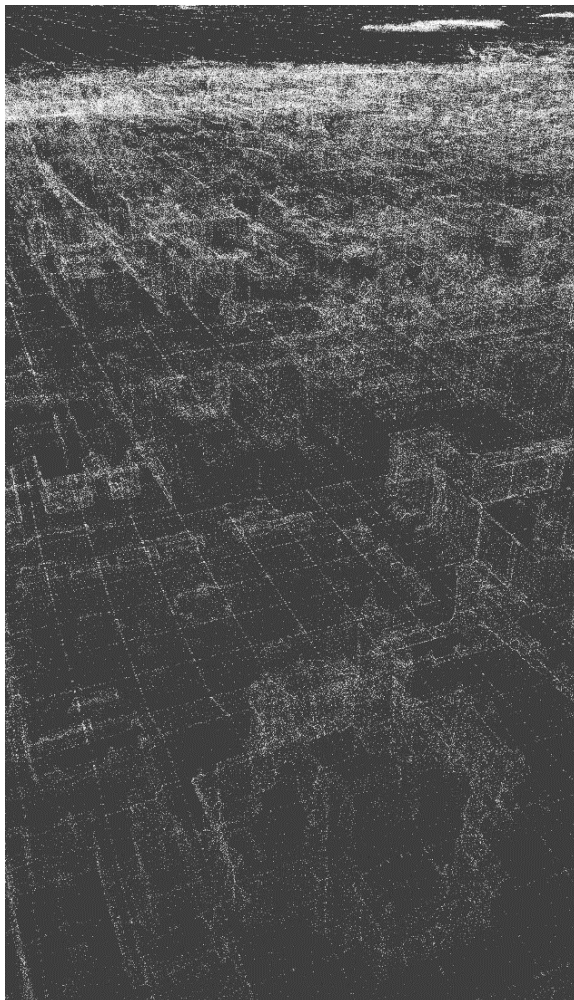
**Kuva 26** Yhdistettyjen neljän kuvablokin vastinpisteet ja ilmakuvien kuvanottoapaikat.

Kokonaisen kaupungin laajuisen kolmioverkkomallin rekonstruointi vaatii runsaasti laskentatehoa, jota pienennetään muodostamalla 3D-malli osissa. Mallinnettava alue rajattiin siten, että aluerajaus kattoi koko rekonstruoitavan alueen, minkä jälkeen rekonstruoitava alue tiilitettiin. Mallinnettava alue jaetaan pienempiin alueisiin tiilityksellä, jolla tarkoitetaan mallin jakamista osa-alueiksi, joiden mallintaminen yksi kerrallaan on mahdollista muun muassa grafiikkaprosessorien laskentatehon rajoissa. Tiilityksessä käytettiin Helsingin kaupungin 250 m x 250 m -karttalehtijakoa. 3D-mallin rekonstruoinnissa voidaan käyttää myös erilaisia kriteerejä, joiden mukaan 3D-malli tuotetaan. Helsingin mallin rekonstruoinnissa käytettiin vesialueiden polygoni- ja pintamalleja, joiden avulla vesialueet saatiin rekonstruoitua vastinpistehavaintojen puuttuessa.

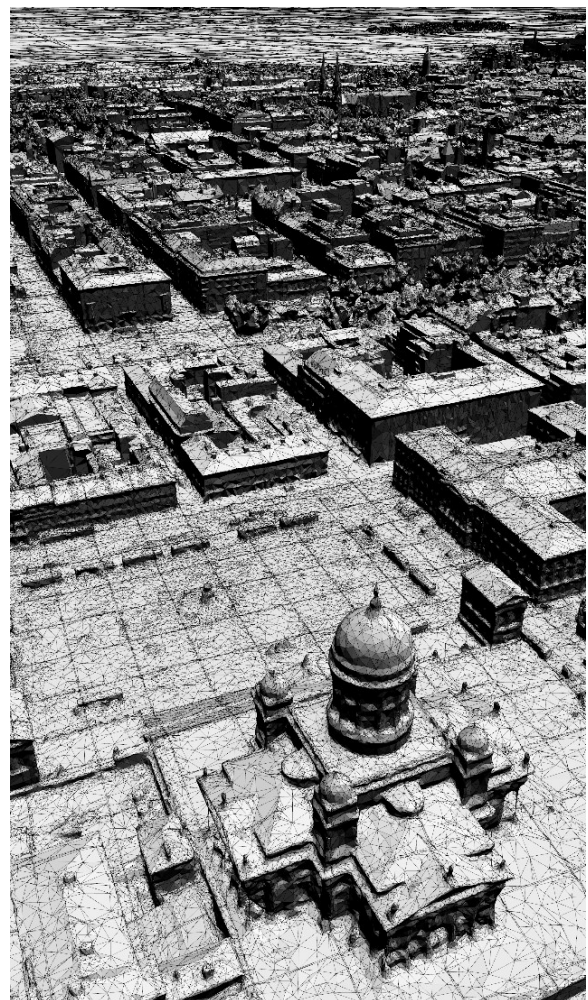
Kolmioverkkomallin rekonstruointi tapahtuu ContextCapture-sovelluksella automaattisin menetelmin ja operoijalta suljettujen useiden prosessointivaiheiden kautta. Rekonstruoinnin tarkkuuteen ja laatuun operoija voi kuitenkin vaikuttaa asetuksia muuttamalla ja valitsemalla asetuksista halutunlaiset vaihtoehdot rekonstruointia varten.

Kolmioverkkomallin valmistuttua laadunvarmistus tulee suorittaa visuaalisella tarkastuksella. Rekonstruoidun fotorealistisen kolmioverkkomallin lisäksi 3D-malli voidaan esittää pistepilvenä, teksturoituna kolmioverkkona, pelkkänä kolmioverkkona näkyvien kolmioiden tahkojen kanssa tai ilman näkyviä kolmioiden tahkoja.

Kuvassa 27 esitetään kuvilta löydettyjen vastinpisteiden muodostama pistepilvi, ja kuvassa 28 nähdään näiden vastinpisteiden muodostama kolmioverkko. Kuvassa 27 ei havaita kaikkia vastinpistehavaintoja, koska muodostettavaa kolmioverkkomallia harvennetaan ja optimoidaan 3D-mallin rekonstruointivaiheessa. Lopputuotteessa on sekä kolmioita että pisteitä paljon vähemmän kuin automaattisen ilmakolmioinnin aikana löydettyjä vastinpisteitä ja niistä muodostettuja kolmioita. Kuvassa 29 esitetään kolmioverkkomalli ilman näkyviä kolmioiden sivuja. Kolmioverkkomallia voidaan kutsua myös nimillä pintamalli tai kuorimalli, koska kolmioverkkomalli mukailee kaikkia maan pinnalla olevien kohteiden pintoja. Kuvassa 30 esitetään kolmioverkkomalli näkyvillä kolmioiden tahkoilla ja teksturoiduilla kolmioilla. Kuvassa 31 nähdään näkymä lopputuotteesta eli fotorealistisesta kolmioverkkomallista.



**Kuva 27** Kuvilta löydettyjen vastinpisteiden muodostama pistepilvi.



**Kuva 28** Vastinpisteistä muodostettu kolmioverkko.





**Kuva 29** Kolmioverkkomalli ilman näkyviä kolmioiden tahkoja.



**Kuva 30** Kolmioiden muodostamaan kolmioverkkoon lisätyt tekstuurit.





**Kuva 31** Näkymä fotorealistisesta kolmioverkkomallista.



### 4.3 Havaintoja valmiista geometrisesta kaupunkimallista

Valmis geometrinen kaupunkimalli on sekä visuaalisesti että geometrisesti erittäin realistinen. Semanttisen tietosisällön ja attribuuttien puuttuessa geometrisesta mallista, ihmisen hahmotuskyvyn ansiosta kolmioverkkomallissa on kuitenkin runsaasti semantiikkaa. Semanttinen tietosisältö ei ole tietokannan muodossa vaan mallia havainnoidessaan ihminen yhdistää huomaamattaan rakennusten näköiset kohteet rakennuksiksi, kasvillisuutta esittävät kohteet puiksi ja pensaiksi sekä autoja muistuttavat muodot autoiksi. Itse asiassa fotorealistisen kolmioverkkomallin sisältämä maailma mallintaa reaali maailmaa erittäin hyvin, koska kolmioverkkomallista löytyvät kaikki kuvaushetkellä paikallaan pysyneet kohteet, mikä havaitaan esimerkiksi kuvista 31 ja 32. Kuvista pannaan merkille myös ilmavalokuville rekisteröityneiden varjojen vaikutus rekonstruoidulle kolmioverkkomallille. Varjot ovat kiinteä osa kolmioverkkomallia.



**Kuva 32** Näkymä geometrisesta kaupunkimallista.

Kolmioverkkomallin virheet ja epätarkkuudet erottuvat mallista parhaiten, kun mallia tarkastellaan lähietäisyydeltä. Yleisesti kolmioverkkomalli näyttää siis visuaalisesti paremmalta etäisyyden kasvaessa. Visuaalisesti optimaalisin katseluetäisyys on yli sata metriä. Fotogrammetrisen pintamallin heikkoudet näkyvät kaupunkimallissa visuaalisen tarkkuuden huonontumisena, kun mallia tarkastellaan lähietäisyydeltä. Kuvassa 33 havainnollistetaan, miltä kaupunkimalli näyttää katutasolta. Lähietäisyyden huono sekä visuaalinen että geometrinen tarkkuus johtuu täysin käytettyjen ilmavalokuvien resoluutiosta.



**Kuva 33** Kolmioverkkomallin heikkoudet erottuvat lähietäisyydeltä.

Lähifotogrammetria tarjoaisi tarkemman resoluution ja tarkempia yksityiskohtia fotogrammetrisen pintamallin rekonstruointiin, mutta kokonaisen kaupungin mallintaminen ei ole tällä hetkellä kustannustehokasta toteuttaa lähifotogrammetrian keinoin. Toisaalta olisi mahdollista hyödyntää sekä ilmavalokuvausta että mobiilikuvausta fotogrammetrisen mallin tuotannossa. Mikäli lähifotogrammetriaa käytettäisiin ilmakuvausten yhteydessä, saataisiin lopputuloksena tarkemmat kohdat 3D-malliin näistä lähikuvatuista kohteista.

Fotogrammetrisen mallin tuottaminen vaatii runsaasti kuvia mallinnettavista kohteista, minkä vuoksi kolmioverkkomallista löytyy sekä tarkasti että epätarkasti rekonstruoituja kohteita. Heikosti rekonstruoitavissa olevia kohteita ovat muun muassa pienet yksityiskohdat sekä kapeat ja piikikkäät elementit, joista havainnollistavia esimerkkejä ja yksityiskohtia esitetään kuvissa 34 ja 35.





**Kuva 34** Pylväs on rekonstruoitunut vain osittain.



**Kuva 35** Sillan tukivaijerit ovat ohuita, jolloin niitä on vaikea rekonstruoida ilmavalokuvista.

Kuvassa 36 havainnollistetaan eri kasvillisuuskohteita, jotka tyypillisesti rekonstruoidut kuvassa näkyvällä tavalla eli fotogrammetrinen pintamalli mukailee puun tai pensaan lehvästön ulottuvuutta. Kasvillisuuskohteet näyttävät toki realistisilta, mutta ero 3D-mallin ja todellisuuden välillä on suuri. Kasvillisuuskohteet ovat vähiten realistisia kohteita verrattuna muihin kaupunkimallilla esiintyviin elementteihin, kuten rakennelmiin, katuihin, vesialueisiin ja niin edelleen. Muiden kuin matalien kasvillisuuskohteiden fotogrammetrinen mallintaminen on haastavaa ja tuottaa yleensä kasvillisuuskohteista kuvan kaltaisia kolmiulotteisia kohteita. Kasvillisuuskohteiden 3D-mallit ovat kuitenkin hyvin fotorealistisia ja kaiken kaikkiaan kasvillisuus on merkittävä osa kaupunkimallia. Lisäksi kasvillisuus on selvästi

erinäköistä eri vuodenaikoina, minkä takia vuodenaikat tulee ottaa huomioon ilmavaloku-  
vauksen ajankohdan suunnittelussa, jotta ilmavalokuva-aineistosta rekonstruoitu 3D-malli  
esittäisi kasvillisuuden halutunlaisena.



**Kuva 36** Fotogrammetrinen pintamalli mukailee myös kasvillisuuskohteiden lehvästön ulottu-  
vuutta.

Geometriset kaupunkimallit eivät sovellu semanttisten kaupunkitietomallien tavoin kehitty-  
neisiin kaupunkianalyysihin tai -simulaatioihin, jotka toimiakseen tarvitsevat muutakin tie-  
toa kuin geometria- ja tekstuuritietoa. Toisaalta geometrisista kaupunkimalleista kolmio-  
verkkomalli sisältää melkein kaikki maanpinnalla olevat kohteet, kuten puut, pensaat, raken-  
nelmat, minkä perusteella malli soveltuisi hyvin analyysihin ja simulaatioihin, joissa hyö-  
dynnetään kohteiden geometrioista, ulottuvuuksista tai tilavuuksista saatavaa informaatiota.  
Kolmioverkkomallista massojen tilavuuksien laskenta onnistuu samaan tapaan kuin mistä  
tahansa fotogrammetrisestä pintamallista.

Georeferoitu kaupunkimalli mahdollistaa myös lukuisten muiden kartta- ja paikkatietoai-  
neistojen yhteiskäytön kaupunkimallin kanssa. Kolmioverkkomallin tehokas käyttö voi pe-  
rustua useisiin muihin kartta- ja paikkatietoaineistoihin ja niiden yhteiskäyttöön kolmioverk-  
komallin kanssa, jolloin kolmioverkkomalli on parhaassa mahdollisessa tapauksessa hyvin  
toimiva hybridimalli. Kolmioverkkomalliin voidaan liittää esimerkiksi suunniteltuja raken-  
nushankkeita, mistä on havainnollistava esimerkki kuvassa 37. Kuvassa näkyy Kalasataman  
aluesuunnitelma, jossa valkoiset rakennukset, rakennelmat ja sillat ovat osa suunnitelma-  
osaa, vesielementti on keinotekoisesti CAD-piirto-ohjelmalla luotu ja kaikki muu on kol-  
mioverkkomallia.





**Kuva 37** Esimerkki kolmioverkkomallin sekä CAD- ja IFC-mallien yhteiskäytöstä.

Koko Helsingin kattavaa kolmioverkkomallia on mahdollista katsella, navigoida ja myös ladata. Malli on katseltavissa Cesium-alustalla WebGL-tekniikkaa tukevalla selaimella. Lisäksi kolmioverkkomalliaineisto on avointa dataa lisenssillä Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen (CC BY 4.0). Aineisto on vapaasti käytettävissä ilman merkittäviä tekijänoikeuden rajoituksia. (HRI, 2017.)

#### **4.4 Kolmioverkkomallin tuotantoprojektin arviointi**

Kolmioverkkomallin tuotantoprojekti on erittäin suoraviivainen. Projektin päävaiheet suoritetaan tietyssä järjestyksessä. Ensiksi suoritetaan aineiston keruu, jonka jälkeen toisena tulevat valmistelevat työt ja viimeiseksi suoritetaan tuotannolliset toimet. Edellä mainitut työvaiheet voivat olla yhtä työläitä ja aikaa vieviä, minkä seurauksena työvaiheiden suorittaminen aikataulussa voi olla haastavaa koko tuotantoprojektin kestolle. Yhden työvaiheen pitkittyminen johtaa koko projektin aikataulun venymiseen.

Kolmioverkkomallin toteutukselle kriittisintä on ilmapalokuva-aineiston laatu. Ilmapalokuvaus tulee ensinnäkin toteuttaa pysty- ja viistoilmakuvauksena, mutta valokuvien laadun ja määrän tulee myös täyttää fotogrammetrisen 3D-mallinnuksen kriteerit. Aineiston keruu eli ilmapalokuvien ottaminen on sekä ajasta että rahasta riippuvaista, minkä vuoksi se on myös yksi kriittisimmistä työvaiheista. Lähtötietoaineiston laatu vaikuttaa ratkaisevasti lopputulokseen.

Valmistelevat työt pitävät sisällään työtehtäviä liittyen lähtötietoaineistojen valmisteluun ja työ määrä valmistelemissa töissä riippuu täysin mallinnettavan kaupungin rakenteesta ja pinta-alasta. Helsingin kolmioverkkomallia varten tehtiin melko paljon valmistelevia töitä, mikä johtuu Helsingin alueen rakenteesta ja pinta-alasta. Valmistelevat työtehtävät voidaan suorittaa missä järjestyksessä tahansa. Valmistelevat työt vaativat jonkin verran työvoimaa

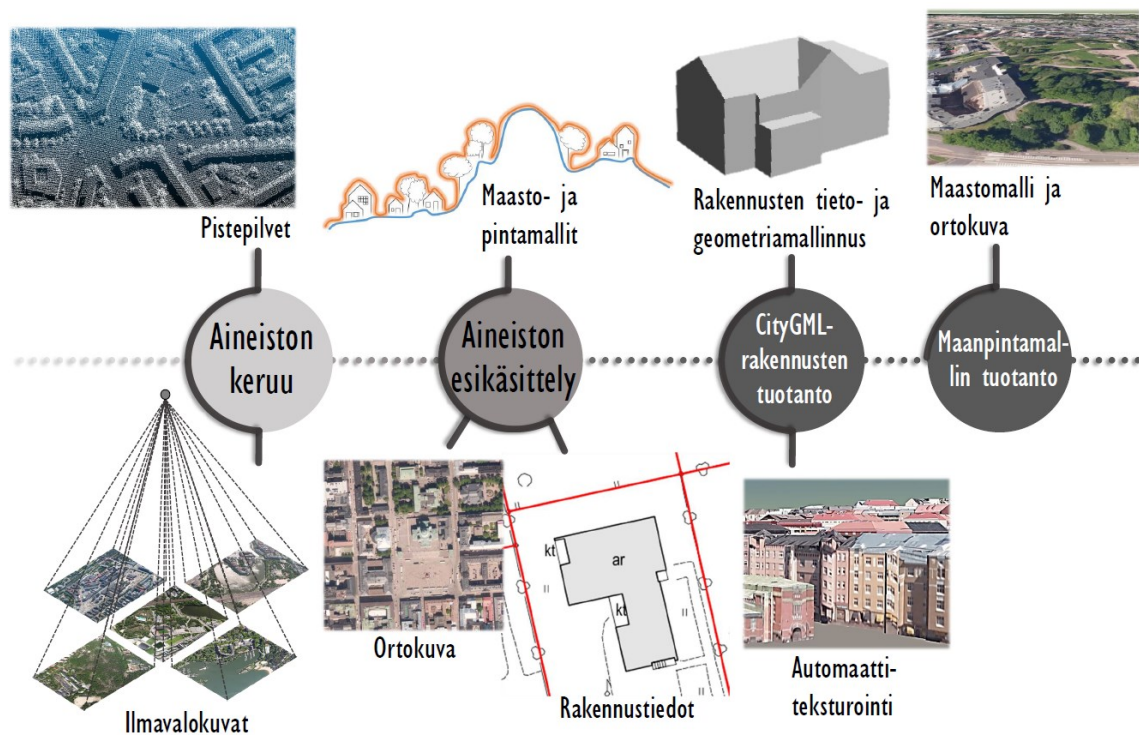
ja teknistä osaamista, jotka ovat tämän työvaiheen suurimmat haasteet. Valmistelevien töiden toteutukseen vaikuttavat huomattavasti työntekijän tekninen osaaminen ja käytössä olevat työvälineet. Valmistelevien töiden määrä voi olla hyvinkin vähäinen riippuen täysin mallinnettavan kaupungin rakenteesta ja pinta-alasta.

Tuotannolliset toimet sisältävät 3D-mallinnussovelluksella suoritettavat työvaiheet, jotka suoritetaan tietyssä järjestyksessä. ContextCapture-mallinnussovelluksen käyttö ei vaadi käyttäjältä erityisosaamista, jolloin lähes kuka tahansa voi toimia sovelluksen operoijana ja tuottaa oikeista lähtötietoaineistoista 3D-malleja. 3D-mallinnussovellukset vaativat kokonaisten kaupunkien laajuisten 3D-mallien laskentaa varten runsaasti sekä laskentatehoa että aikaa. Lisäksi kustannus joko omasta 3D-mallinnussovelluksesta tai ulkoistetusta 3D-mallin tuotannosta voi olla melko suuri.

## 5 CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojekti

Helsingin kaupunki tuotti koko kaupungin kattavan CityGML-kaupunkitietomallin, joka avattiin avoimena datana marraskuussa 2016. Marraskuussa lanseerattu 3D-kaupunkitietomalli sisältää kaikki Helsingissä sijaitsevat rakennukset CityGML-muodossa ja koko kaupungin kattavan maanpintamallin. CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojektin ensimmäisessä vaiheessa tietomallinnettiin kaikki Helsingin alueella olevat rakennukset LoD1- ja LoD2-tarkkuustasoilla. Kaupunkitietomallinnuksen ensimmäisessä vaiheessa tuotettiin myös maanpintamalli, jonka päällä nämä CityGML-muotoiset rakennukset voidaan esittää. Tuotantoprojektin seuraavissa vaiheissa kaupunkitietomalliin voidaan lisätä CityGML-moduulien avulla muita kaupunkimallikohteita, kuten sillat, puusto, vesistö, maanpintamalli ja eri maankäyttöalueet. Lisäksi ADE-laajennusominaisuuksien käyttö on jatkossa mahdollista.

CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojektin vaiheet välituotteineen esitetään kuvassa 38. Tuotantoprojekti alkaa lähtötietoaineiston keruulla, minkä jälkeen aineistoista jalostetaan välituotteita. Välituotteiden avulla saadaan tuotettua CityGML-standardin mukaiset rakennukset sekä maan pintaa esittävä maanpintamalli.

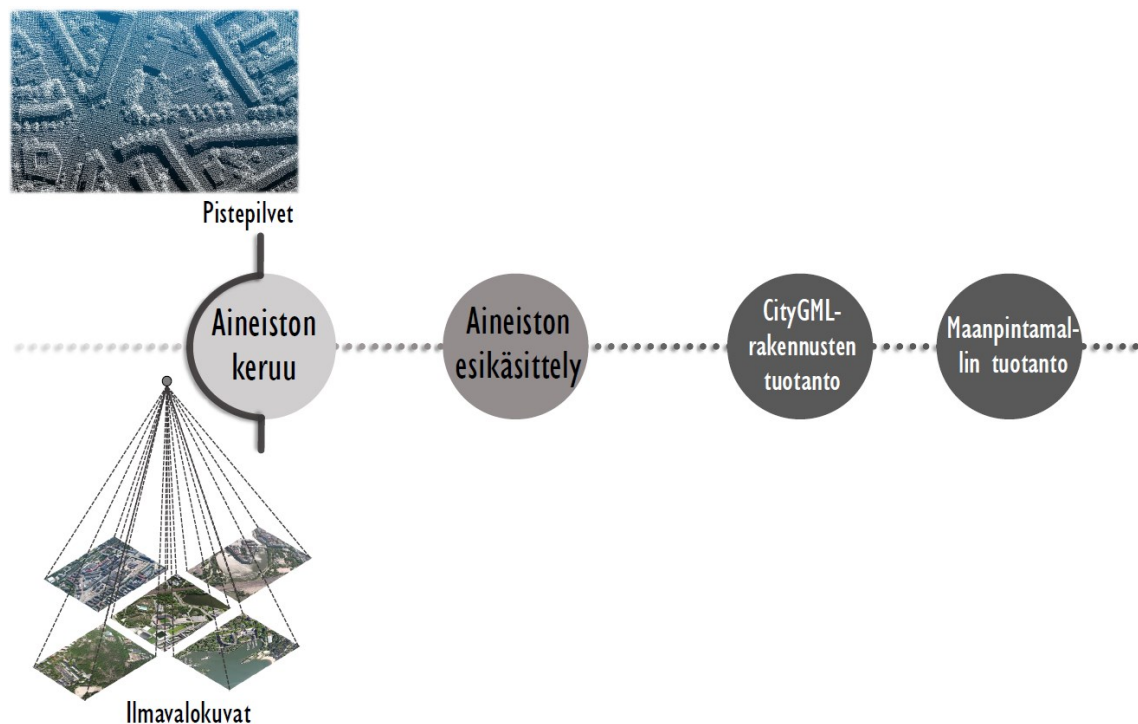


**Kuva 38** CityGML-tietomallin tuotantoprojektin vaiheet ja välituotteet.

## 5.1 Aineiston keruu ja käsittely

CityGML-kaupunkitietomallin tuottamisessa käytetään hyväksi useita eri aineistoja, joita ovat muun muassa laserkeilausaineisto, kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistot sekä ilmavalokuvat. Kunnilta löytyvät jo kaksiulotteiset kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistot, joita käytetään lähtötietoaineistoina kaupunkimallikohteiden kolmiulotteisessa tietomallinnuksessa. Kaupunkimallikohteiden identtisyys muiden aineistojen kanssa on äärimmäisen tärkeää kaupunkitietomallin ylläpidolle ja käytölle. Kaupunkitietomalli sisältää kohteita, jotka ovat paikannettavissa muista kunnan ylläpitämistä aineistoista. Täten kaupunkitietomallin kohteiden tiedetään olevan identtisiä esimerkiksi asemakaavan pohjakartalta löytyvien kohteiden kanssa.

Kolmiulotteinen kaupunkitietomallinnus alkaa aineiston keruulla, jolla tarkoitetaan 3D-kaupunkitietomallinnuksessa tarvittavien lähtötietoaineistojen hankintaa. 3D-kaupunkitietomallin tuotantoprojektin ensimmäistä vaihetta esittää kuva 39. Kuvassa esitetään kaksi lähtötietoaineistoa, jotka ovat laserkeilauksen avulla kerätyt luokitellut pistepilvet ja ilmakuvausella saadut ilmavalokuvat. Erikseen hankittavat lähtötietoaineistot eli pistepilvi- ja ilmavalokuva-aineistot hankitaan koko kaupungista.



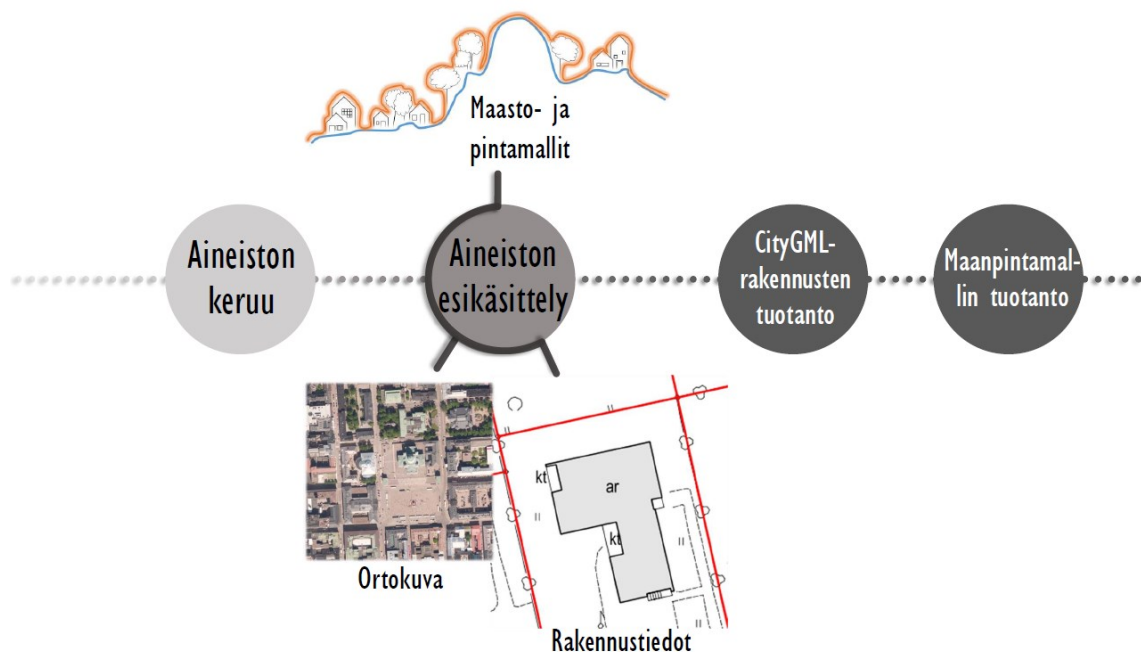
**Kuva 39** Tuotantoprojektin alkuvaihe eli pistepilvi- ja ilmavalokuva-aineiston keruu.

Laserkeilausaineistoa käytetään kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistojen kanssa rakennusten tietomallinnuksessa sekä laserkeilausaineistosta tuotetaan digitaaliset maasto- ja pinta-

mallit. Luokitellusta pistepilvestä pystytään automaattisesti mallintamaan maaston pinnanmuodot. Pistepilvestä johdettuja korkeusmalleja käytetään ortokuvien tuottamisessa sekä rakennusten ja niiden kattomuotojen automaattisessa mallintamisessa.

Pysty- ja viistoilmakuvia sekä pystyilmakuvista jalostettuja ortokuvia käytetään kaupunkitietomallikohteiden teksturointiin. Pysty- ja viistoilmakuvilla teksturoidaan rakennusten seinä- ja kattopinnat. Ortokuvia käytetään maanpintamallin teksturointiin.

Kaupunkimallin tuotantoprojektin aineiston keruun jälkeinen vaihe, joka esitetään kuvassa 40, käsittää aineiston esikäsittelyosuuden ennen varsinaista rakennusten 3D-tietomallinnusta ja maanpintamallin tuottamista. Aineiston esikäsittelyllä pistepilvistä saadaan tuotettua digitaaliset maasto- ja pintamallit sekä pystyilmakuvista saadaan jalostettua ortokuva-aineisto. Aineiston käsittelyyn luetaan mukaan myös kantakartalta löytyvien rakennusten kivistä vektorien käsittely ja rakennusten identifiointi.



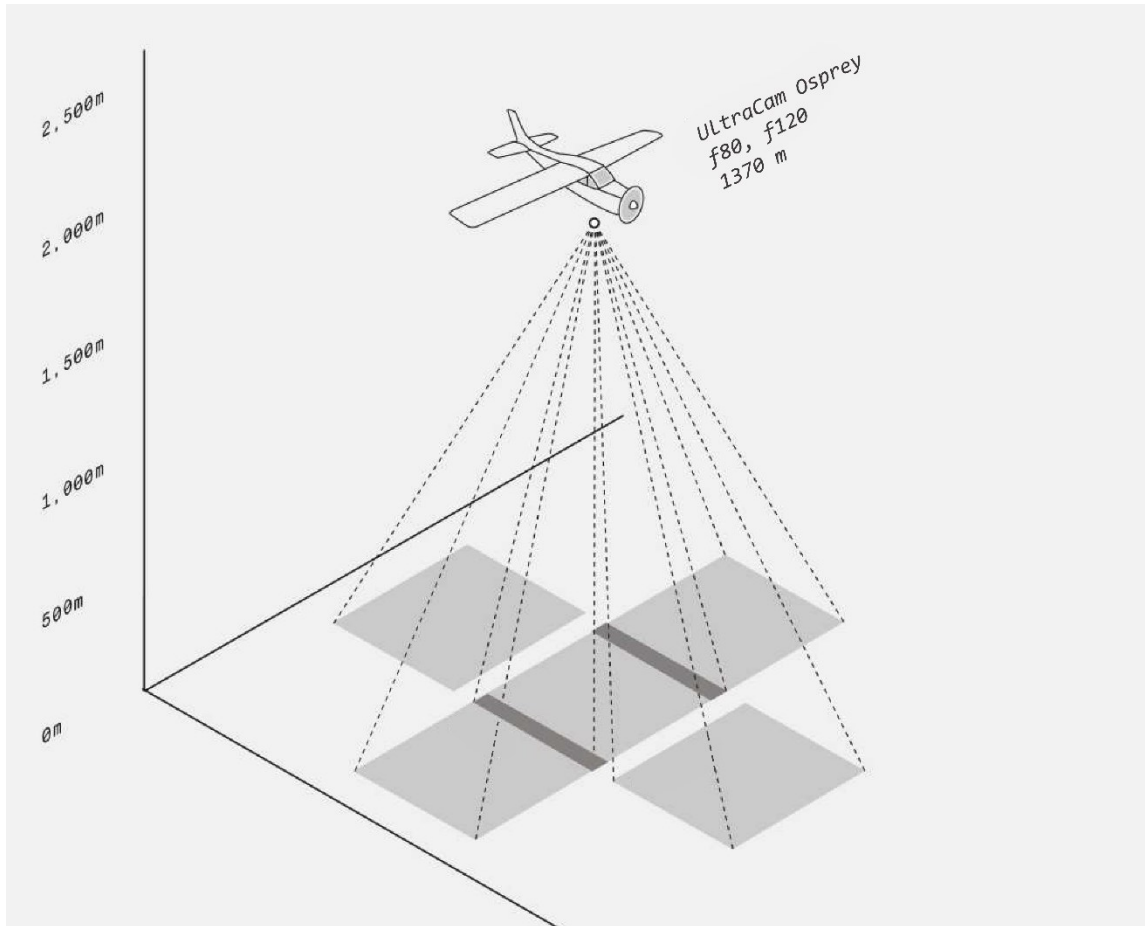
**Kuva 40** 3D-kaupunkitietomallinnuksen aineiston esikäsittelyssä tuotetut välituotteet.

### 5.1.1 Ilmavalokuvat

Ilmavalokuvauksen suoritti ulkopuolinen taho. Pysty- ja viistoilmakuvauksessa käytettiin UltraCam Osprey Prime viiden kameran viistokamerajärjestelmää, joista yksi kamera osoitti kohti nadiiria ja muut neljä kameraa lentosuuntaan nähden joko eteenpäin, taaksepäin, oikealle tai vasemmalle. Nadiiri tarkoittaa suoraan havaitsijan alapuolella olevaa pistettä. Käytännössä kuvausjärjestelmä aiheuttaa sen, että kuvaussuunta ei ole täsmälleen kohti nadiiria, vaikka puhutaankin nadiirikuvauksesta.



Kuvassa 41 havainnollistetaan käytettyä ilmakuvauusjärjestelmää, joka koostui viidestä kalibroidusta mittakamerasta, joista yksi oli nadiirikamera ja neljä muuta viistokameroita. Viistoilmakuvat otettiin 45 asteen kulmassa, mikä mahdollisti vertikaalien pintojen kuten rakennusten julkisivujen tarkan resoluution. Nadiirikameran polttoväli oli 80 mm ja viistokameroiden vastaavasti 120 mm. (Vexcel Imaging, 2016.)



**Kuva 41** Pysty- ja viistoilmakuvauksen kuvausjärjestelmä. (Vexcel Imaging, 2016, mukaillen)

Ilmakuvauksen kuvablokin peittosuhteet olivat seuraavat: rinnakkain lennettävien lentojen sivupeitto oli 65 % ja pituuspeitto 80 %. Ilmakuvaukseen suoritettiin lentokoneella, jonka lentokorkeus oli noin 1370 metriä. Kuvauslennon reitti perustui navigointiin GPS (Global Positioning System) -laitteella. Paikannus- ja asentomittausjärjestelmällä rekisteröitiin sekä lentokoneen reitti että kamerajärjestelmien asento. Kuvien tarkkuus eli maastoerotuskyky (GSD, Ground Sampling Distance) oli pystykuvilla noin 10 cm ja viistokuvilla noin 15 cm. Pysty- ja viistoilmakuvat tallennettiin kolmikanavaisina sisältäen punaisen, vihreän ja sinisen RGB-kanavan.

Raakakuvatiedoille tehtiin kuvien asento- ja paikannushavaintojen avulla jälkikäsittely, jossa kuvista korjattiin kamerajärjestelmän aiheuttamia radiometrisia ja geometrisia virheitä sekä ratkaistiin orientointitiedot. Asento- ja paikannustiedoista ratkaistiin kuvien ulkoisen orientoinnin tekijät. Täten saatiin alkuarvot jokaisen kuvan sijainti- ja asentotiedoista ETRS-

GK25/N2000-koordinaatistossa. Kuvien absoluuttinen orientointi ratkaistiin tukipisteillä, jotka mitattiin manuaalisesti kuvilta. Kuvien muodostaman kuvablokin absoluuttinen orientointi ratkaistiin sädekimpputasoituksena, jonka aikana myös liitospisteiden koordinaatit ja kuvien orientoinnit ratkaistiin. Sädekimpputasoituksen aikana ratkaistiin myös itsekalibrointi. Kalibrointituloksia voidaan käyttää kuvauskohtaisten systemaattisten virheiden poistamiseen.

Korjattujen kuvien on tarkoitus toimia fotogrammetrisissa mittauksissa piirtovirheettöminä keskusprojektiokuvina. Lopputuotteena syntyivät 24-bittiset täysväriset kuvat, joita oli yli 50 000 kappaletta. Valokuva-aineiston pystyilmakuvien resoluutio oli 11674 x 7514 pikseliä ja viistoilmakuvien pikselikoko oli 8900 x 6650 pikseliä.

### **5.1.2 Pistepilvet**

Laserkeilaus teetettiin ulkopuolisella taholla. Ilmalaserkeilaus toteutettiin lentokoneella käyttäen Leican sekä ALS-70 HP- että ALS-70 CM -keilaimia. Laserkeilauksen lentokorkeus oli noin 530 m (ALS70-HP) /475 m (ALS70-CM) maanpinnan keskikorkeudesta. Lentojonojen sivupeitto oli 50 %, keilauksen avauskulma (FOV, Field of View) 35 astetta ja keilaustaajuus 500 kHz. Pistetiheys nadiirissa oli 20 pistettä/m<sup>2</sup>. Keilauslennon reitti perustui GPS-navigointiin, minkä aikana rekisteröitiin sekä lentoreitti että keilaimen asento paikan- ja asentomittausjärjestelmällä.

Laserkeilausaineisto prosessoitiin georeferoiduksi pistepilveksi, jonka laserpisteet luokiteltiin eri luokkiin automaattisilla luokittelumenetelmillä. Pistepilvien luokittelu perustui yleisesti käytettyyn luokitteluun eli ASPRS-luokittelumenetelmään. Pistepilven luokittelussa hyödynnettiin myös vektoriaineistoa. Erilaiset aluemaiset kohteet ja rakennetut objektit luokiteltiin omiksi luokiksi näitä kohteita määrittävillä vektoriaineistoilla. Kaupunkitietomallin lähtötietoaineistona pistepilven tulee olla käyttökelpoista koko kaupunkimallin rajauksen alueella. Automaattisesti luokiteltu laserkeilausaineisto ja ilmakuvat ovat vain osa CityGML-kaupunkitietomallin lähtötietoaineistoista.

### **5.1.3 Korkeusmallien tuotanto**

Luokitellusta pistepilvestä pystytään automaattisesti mallintamaan digitaaliset korkeusmallit, joita ovat maasto- ja pintamallit. Luokiteltu laserkeilausaineisto soveltuu automaattiseen maaston pinnanmuotojen kolmiulotteiseen mallintamiseen. Molempia korkeusmalleja, maasto- ja pintamalleja, käytettiin rakennusten ja niiden kattomuotojen automaattisessa mallintamisessa. Digitaalista maastomallia käytettiin myös ortokuvien tuottamisessa sekä maanpintamallina kaupunkitietomallissa.

Pintamalli tuotettiin laserkeilausaineistosta käyttäen hyväksi laserpisteiden luokittelua. Pintamalliin otetaan yleensä laajemmin pisteluokkia, koska pintamalli mukailee kaikkia maanpinnalla olevia kohteita, jolloin on parempi ottaa pintamallin mallintamista varten enemmän laserpisteitä kuin liian vähän.

Digitaalinen maastomalli tuotettiin luokitellusta pistepilvestä. Maastomallin mahdollisia esitysmuotoja ovat säännöllinen hilarakenne, kolmioverkko, taiteviivat ja massapistet. Maastomalli tuotettiin ainoastaan maanpinnan korkeuspisteitä sisältämän aineiston avulla. Aineiston avulla kolmioitiin maanpinta, minkä tuloksena saatiin kolmioverkko. Kolmioitu maastomalli sisältää sekä koordinaattiarvot kolmioiden kärkipisteistä että tiedot eri pisteiden välisistä yhteyksistä. Maastomalleja tuotettiin useampia kappaleita, joista yhtä käytettiin ortokuvan tuotannossa ja toista rakennusten puoliautomaattisessa tietomallinnuksessa. Yksi maastomalli oli kaupunkitietomalliin lisättävä maanpintamalli. Maastomallien melko helppo tuottaminen mahdollistaa useiden eri maastomallien tuottamisen. Rakennusten geometria- ja tietomallinnuksessa käytetyt pinta- ja maastomallit mallinnettiin hila-alkioina, joiden hila-koko oli 50 cm.

#### **5.1.4 Ortokuvan tuotanto**

Pystyilmakuvista voidaan tuottaa orto-oikaistu ilmakeku, josta on poistettu perspektiivisen kuvautumisen ja maanpinnan korkeusvaihtelujen aiheuttamat vääristymät. Ortokuvan tuottaminen vaatii oikaisuun oikaisupintaa, joka voi olla maanpinnan pintamalli tai kohteen pinnan korkeusmalli. Pystykuvat oikaistiin käyttäen hyväksi laserpisteaineistosta tuotettua digitaalista maastomallia. Ortokuva-aineiston prosessoinnin suoritti ulkopuolinen taho. Ortokuvien maastoerotuskyky oli noin 10 cm ja kuva-aineisto kattoi koko Helsingin alueen. Ortokuva-aineistoa käytettiin maanpintamallin teksturointiin.

#### **5.1.5 Rakennusten kivijalkavektorien käsittely**

Asemakaavan pohjakartta, toiselta nimeltään kantakartta, on kunnan ylläpitämä ja muodostaa perustan asemakaavoitukselle ja kiinteistönmuodostukselle. Ajantasainen kantakartta pitää sisällään tietoja muun muassa kiinteistörajoista, -tunnuksista, rakennuksista, rakennelmista, maastosta ja maanpinnan korkeuskäyristä. Asemakaavan pohjakartalla olevat kohteet ovat luokiteltuja vektorimuotoisia kohteita. Kantakartalla oleva rakennetut tilat -teema sisältää rakennukset ja muut ihmisen valmistamat rakennelmat sekä tietoja näiden käyttötarkoituksesta ja ominaisuuksista. (JUHTA 2014.)

Perinteiset kantakartan mittaus- ja kuvaustekniset ohjeet eivät aina parhaiten tue 3D-mallintamista. Tästä huolimatta 3D-kaupunkitietomallinnuksessa pitäydettiin kantakartan kuvaustekniikassa. 3D-kaupunkitietomallin toteuttamisen lähtökohtana on, että kantakartalta löytyvät kohteet ovat paikannettavissa samanlaisina ja samasta sijainnista 3D-kaupunkitietomallista.

Kantakartan rakennetut tilat -teeman sisältämä rakennus-kohdeluokka pitää sisällään rakennusluvan edellyttämiä maanpäällisiä rakennuksia. Näillä rakennuksilla on olemassa rakennustunnus, joka on rakennuksen yksilöivä tunnus. Tämän kohdeluokan rakennukset ovat sekä oleellisimpia että merkittävimpiä kaupunkimallille, minkä vuoksi nämä rakennukset mallinnetaan sekä LoD1- että LoD2-tarkkuustasolla. Esimerkiksi Facta-kuntarekisteri sisältää kunnan alueella olevista rakennuksista tietoja, joita pystytään linkittämään rakennustunnuksen tai muun yksilöllisen tunnuksen avulla tietomallissa oleville rakennuksille. Näiden rakennustunnusellisten rakennusten lisäksi sekundääriset rakennukset eli talousrakennuk-



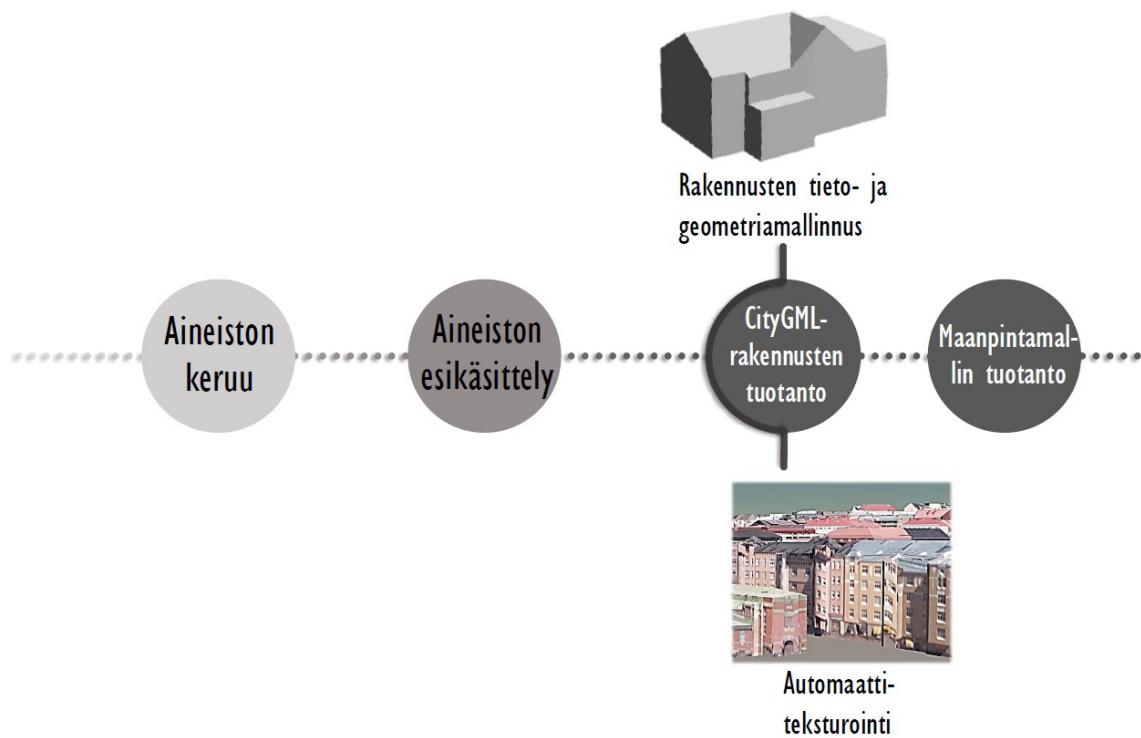
set ja muut pienet rakennelmat mallinnetaan kaupunkitietomalliin. Sekundäärisille rakennuksille ei ole olemassa yksilöivää tunnusta, minkä vuoksi talousrakennukset pitää identifioida erikseen eli rakennelmille tulee lisätä keinotekoisesti yksilölliset tunnukset. Kaupunkimalliin mallinnettujen kohteiden yhdenmukaisuus muiden olennaisten kartta- ja paikkatietoaineistojen kanssa on sekä ylläpidolle että kaupunkimallin käytölle erittäin tärkeää. Kaupunkimallinnuksen lähtökohtana onkin, että kantakartalta löytyvien rakennusten kivijalkavektorien sijainnit toistuvat samanlaisina 3D-kaupunkitietomallissa.

Rakennus-kohdeluokan geometria on aluemainen. Rakennukset kuvataan tasokoordinaatistossa sulkeutuvina aluemaisina kohteina, joiden vektorimuotoinen alue käsittää rakennuksen kivijalan sijainnin ja sen ulottuvuuden. Kantakartta sisältää rakennusten osalta muun muassa niiden kivijalkavektorit, jotka on määritetty seinä- tai räystäslinjojen avulla. Pääosin rakennusten ulottuvuus on kuvattu kantakartoille seinälinjojen avulla, mutta joidenkin rakennusten osalta ulottuvuus on kuvattu räystäslinjoilla. Rakennuksen ulottuvuuden mallinnuksessa käytetyn rakenteen ollessa räystäslinja, on se tallennettu attribuuttina kivijalkavektoriin. Tällöin on tiedossa ne rakennukset, joiden mallinnuksen lähtötietoina on käytetty räystäslinjaa seinälinjan sijasta.

Kantakartalla esiintyviä rakennus-kohdeluokan kivijalkavektoreita ja yksilöllisiä tunnuksia käytettiin lähtötietoina rakennusten CityGML-tietomallinnuksessa. Helsingin kaupungin asemakaavan pohjakartalla olevia rakennus-kohdeluokan polygoneja korjattiin niiden epätäydellisyyden vuoksi. Polygonien tulee olla eheitä ja sulkeutuvia. Kaupungin tietomallinnusvaiheessa Helsingin alueella ja kantakartalla olevia varsinaisia rakennuksia oli noin 50 000 ja sekundäärisiä rakennuksia eli talousrakennuksia oli noin 30 000. Kaikkiaan noin 80 000 rakennuksen kivijalan geometria ja yksilöllinen tieto rekisteröitiin kantakartan ja kuntarekisterin avulla.

## **5.2 CityGML-rakennusten tuotanto**

CityGML-rakennusten tuotantovaihe voidaan jakaa kahteen kuvassa 42 näkyvään vaiheeseen, joita ovat tieto- ja geometriamallinnus sekä automaattiteksturoida. CityGML-standardin mukaisten kohteiden mallinnuksessa tuotetaan sekä geometrisesti, topologisesti että semanttisesti eheitä CityGML-kohteita. Näille CityGML-kohteille voidaan jatkossa linkittää lähes rajattomasti ominaisuus- ja attribuuttitietoja. CityGML-rakennusten varsinainen tuotanto-osuus alkaa rakennusten tieto- ja geometriamallinnuksella, jonka jälkeen CityGML-kaupunkimallikohteisiin liitetään ulkoasu. CityGML-rakennusten ulkopintaan sovitetaan automaattiteksturoidilla julkisivu- ja kattotekstuurit.



**Kuva 42** CityGML-rakennusten varsinaisen tuotannon vaiheet.

### 5.2.1 Semanttisen geometriamallin tuotanto

Rakennusten kolmiulotteinen tietomallintaminen teetettiin tilaustyönä saksalaisella virtualcitySYSTEMS-yrityksellä. Rakennusten puoliautomaattinen mallinnustyö toteutettiin BuildingReconstruction-sovelluksella, jonka BuildingReconstruction 2015 -sovellusversioilla voidaan tuottaa CityGML-standardin mukaisia kolmiulotteisia rakennuksia LoD1- tai LoD2-tarkkuustasolla. Tässä projektissa tuotettiin 3D-rakennukset sekä LoD1- että LoD2-tarkkuustasoilla.

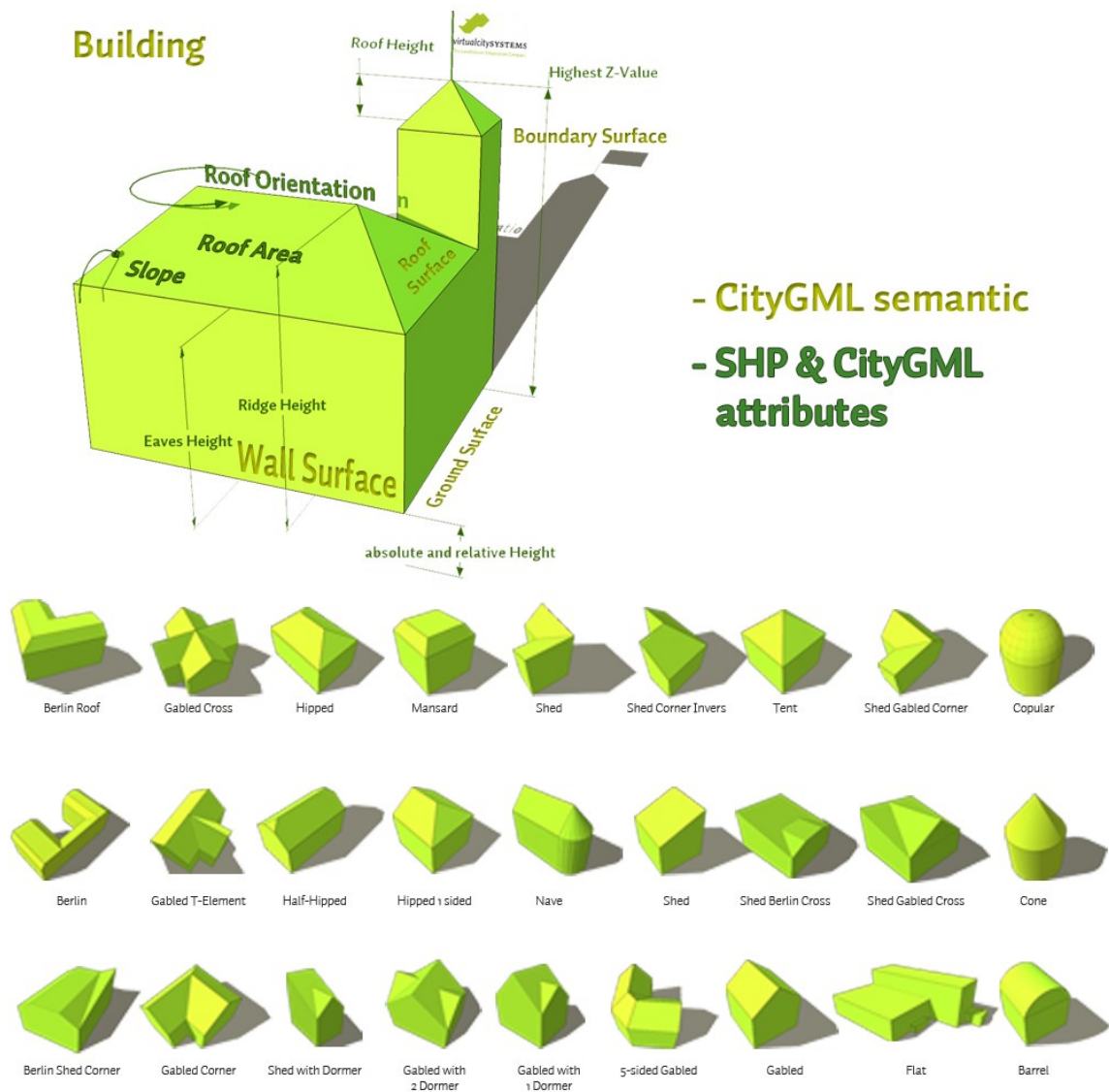
Koko kaupungin laajuinen 3D-mallinnus on kannattavaa tehdä joko LoD1- tai LoD2-tarkkuustasolla, koska tällöin pystytään parhaiten hyödyntämään puoliautomaattista 3D-mallinusta ja jo olemassa olevia kartta- ja paikkatietoaineistoja. LoD3- tai LoD4-tasoisien koko kaupungin laajuisen mallin tuottaminen ei ole nykyhetkellä järkevää, sillä tarkempi kohteiden mallintaminen vaatii yksityiskohtaisempaa informaatiota mallinnettavista kohteista. LoD2-tasoisien mallin tarkkuustaso riittää yleisimpiin ja keskeisimpiin kaupunkianalyyseihin ja -simulaatioihin.

BuildingReconstruction-sovellus mahdollistaa sekä automaattisen rakennusten muodostamisen että manuaalisen rakennusten mallintamisen ja editoinnin. Lähtötietoina BuildingReconstruction-sovellukselle annettiin mallinnettavien rakennusten tunnistetiedot ja kivistä vektorit, maasto- ja pintamalli rakennusten sijaitsemalta alueelta sekä ortokuvia.

Rakennuksen kivijalkavektori näytti rakennuksen sijainnin ja ulottuvuuden tasossa. Molemmat korkeusmallit, pinta- ja maastomallit, tuotiin sovellukseen säännöllisinä hila-alkioina. Korkeusmallien tulee täyttää tietyt minimi tarkkuusvaatimukset, jotta rakennusten laskenta näiden mallien avulla on mahdollista. Käytettyjen pinta- ja maastomallien hila-alkioiden koko oli 50 cm.

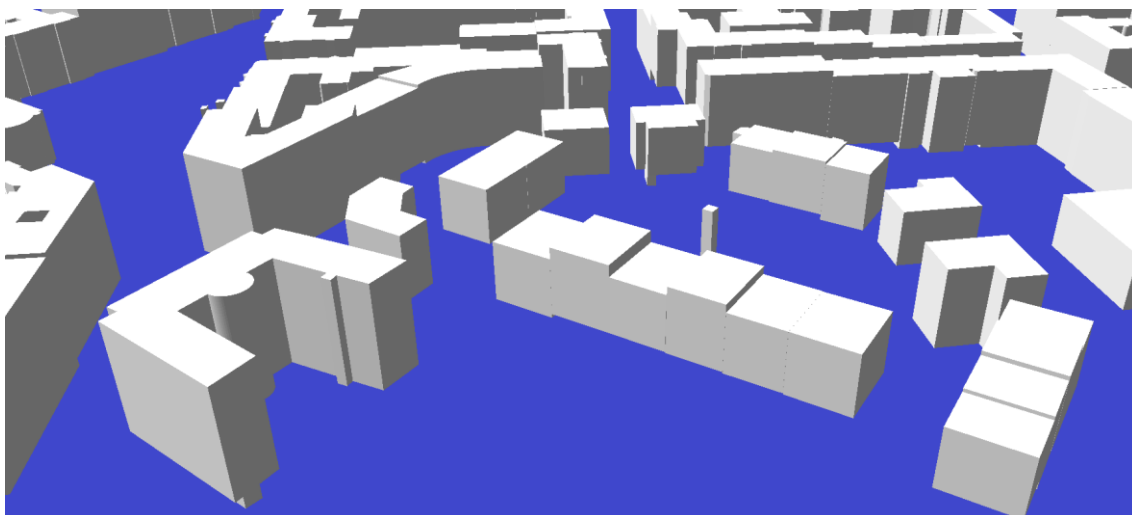
Ortokuvien käyttö on valinnaista, sillä niitä ei tarvita 3D-rakennusten muodostukseen eikä niiden käyttö vaikuta automaattisesti muodostettujen rakennusten lopputulokseen. Ortokuvia voidaan käyttää visuaaliseen tarkasteluun, rakennuksen kattomuotojen tarkastamiseen ja yleiseen laadunvarmistukseen. Ortokuvista on suuresti hyötyä, mikäli rakennuksia manuaalisesti editoidaan tai alusta asti muodostetaan manuaalisesti.

Lähtötietojen annon jälkeen sovelluksella suoritettiin pintamallille automaattinen rakennusten tunnistaminen. Rakennuksen kivijalkavektorin korkeus lasketaan maastomallin avulla, minkä jälkeen pintamallista tunnistetaan rakennuksen katonharjan korkeus. LoD2-tasoisissa rakennuksissa kattojen eri muodot mallinnetaan, mikä on mahdollista BuildingReconstruction-sovelluksen käyttämien vaihtoehtoisten kattomuotojen avulla. Kuvassa 43 esitetään rakennuksen muodostamiseen liittyviä rakennuksen osia ja vaihtoehtoisia kattomuotoja. Sovellus valitsee automaattisesti jokaiselle rakennukselle tietyn kattomuodon, mikäli se vain on mahdollista. BuildingReconstruction-sovellus muodostaa täysin automaattisesti jopa 80–85 % kaikista rakennuksista. Loput muodostettavat rakennukset voi sovelluksen operoija editoida tai muodostaa manuaalisesti.

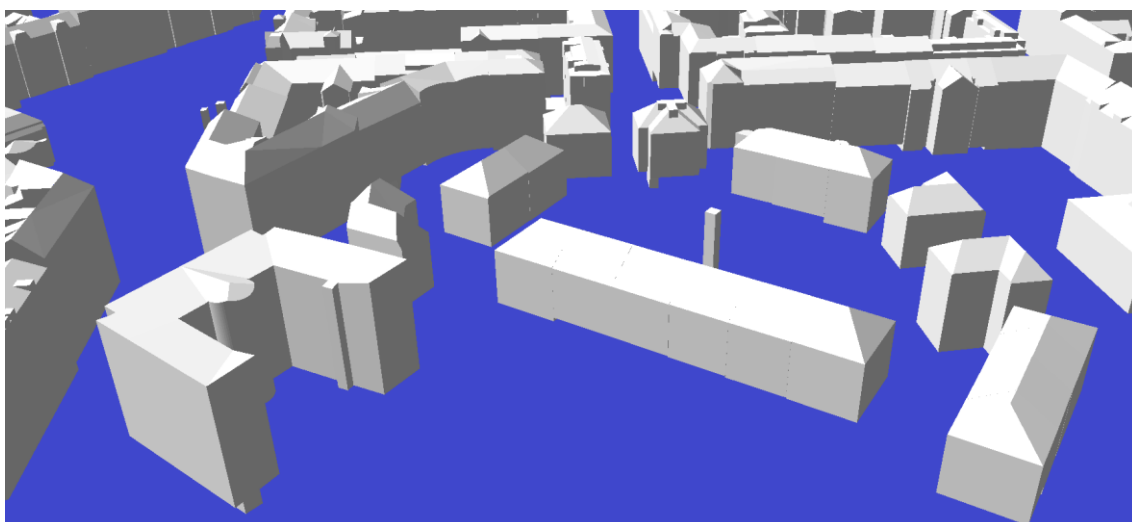


**Kuva 43** Rakennuksen muodostaminen tapahtuu rakennusosien määrittämisellä ja kattomuodon valinnalla. (virtualcitySYSTEMS, 2017b)

Kaikkiaan noin 80 000 rakennusta mallinnettiin puoliautomaattisesti rakennusten tunnistetietojen ja kanta-kartan kivijalkavektorien, laserkeilausaineistosta johdettujen maasto- ja pintamallien sekä ortokuvien avulla. Lopputulokset LoD1- ja LoD2-tasoisista CityGML-rakennuksista esitetään kuvissa 44 ja 45. Kaupunkitietomalliin 3D-tietomallinnetut rakennukset ovat tunnistetietojen avulla paikannettavissa monista muista kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistoista. Lisäksi CityGML-rakennusten kivijalat ovat identtisiä asemakaavan pohjakartan rakennusten kivijalkavektorien kanssa.



**Kuva 44** Tietomallinnetut LoD1-tasoiset CityGML-rakennukset. (Helsingin kaupunki)



**Kuva 45** Tietomallinnetut LoD2-tasoiset CityGML-rakennukset. (Helsingin kaupunki)

### 5.2.2 Automaattiteksturointi

Visuaalinen ilme on hyvin olennainen osa kaupunkimallia. CityGML-kaupunkitietomalli-kohteille voidaan lisätä ulkoasu, joka voi olla mikä tahansa visualisointitapa. Eri ulkoasuja käyttämällä voi visualisoida kohteita erilaisten teemojen mukaan.

Semanttisille ja geometrisille LoD2-tasoisille CityGML-rakennuksille lisättiin ulkoasu eli rakennusten kattojen ja seinien ulkopinnoille liitettiin tekstuuri ilmapalokuva-aineistosta. Rakennusten katto- ja julkisivutekstuurit valikoitiin pysty- ja viistoilmakuvista. Lopputulos teksturoiduista LoD2-tasoisista rakennuksista esitetään kuvassa 46. Rakennusten automaattiteksturointi tilattiin ulkopuoliselta taholta. Rakennusten teksturointiin on olemassa automaattisia ratkaisuja. Tämäkin työvaihe suoritettiin lähes automaattisesti.



**Kuva 46** LoD2-tasoisille rakennuksille liitettiin ulkoasut, joiden tekstuurit otettiin ilmapalokuvista. (Helsingin kaupunki)

### 5.2.3 Rakennusten ominaisuustiedot

Jokaisella CityGML-rakennuksella on tunnistetieto, jonka perusteella rakennus voidaan paikantaa ja löytää muista kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistoista. Tämän tunnistetiedon avulla voidaan kulloinkin kyseessä olevalle rakennukselle joko linkittää tai lisätä rakennukseen liittyviä ominaisuustietoja. Kuvassa 47 näkyvälle rakennukselle on lisätty rakennukseen liittyviä kuntarekisteri- ja geometriatietoja. CityGML-rakennukselle voidaan lähes rajattomasti lisätä attribuutti- ja ominaisuustietoja. Esimerkiksi Facta-kuntarekisteri sisältää kunnan alueella olevista rakennuksista tietoja, joita pystytään joko lisäämään tai linkittämään CityGML-rakennusten tunnistetietojen avulla näille kyseisille CityGML-rakennuksille.



**Kuva 47** Rakennuksiin voidaan lisätä tai linkittää ominaisuustietoja. (Helsingin kaupunki)



### 5.3 Maanpintamallin tuotanto

Kaupunkimallin yksi olennaisimmista osista on maanpintamalli. Kaupunkitietomallissa olevalla maanpintamallilla mahdollistetaan kaupunkimallikohteiden esittäminen oikealla korkeudella. Kuvassa 48 havainnollistetaan, kuinka rakennukset leijuvat pelkän ortokuvan päällä maastomallin puuttuessa kaupunkitietomallista.



**Kuva 48** Rakennukset leijuvat ortokuvan päällä, maastomallin puuttuessa kaupunkitietomallista. (Helsingin kaupunki)

Maanpinnan muotoja ja korkeusvaihteluja esitetään digitaalisella maastomallilla, joka tuotetaan luokitellun pistepilven avulla. Kaupunkitietomalliin lisätty maastomalli on perinteinen digitaalinen maastomalli. Maanpintamalli koostuu digitaalisesta maastomallista ja sen päälle liitetystä ortokuva-aineistosta. Maanpintamallin lopputulos nähdään kuvassa 49, josta havaitaan, että rakennukset sijaitsevat nyt maanpinnan päällä. Maanpintamallista on mahdollista jatkossa tuottaa CityGML-standardin mukainen maanpintamalli.



**Kuva 49** Kaupunkitietomalli sisältää maanpintamallin ja CityGML-rakennukset. (Helsingin kaupunki)

Maastomallin tuottaminen on prosessina melko yksinkertainen, mikä mahdollistaa useiden vaihtoehtoisten maastomallien tuottamisen ja lopuksi parhaan mahdollisen maastomallin valinnan kaupunkitietomalliin lisättäväksi maanpintamalliksi. Maastomallin laatua tarkastellaan tyypillisesti pääasiassa visuaalisesti, jolloin voidaan huomata mahdolliset virheet maastomallissa. Esimerkiksi kaupunkitietomalliin lisätyn maastomallin tuotannossa ei ole käytetty taiteviivoja, joiden puuttuminen näkyy esimerkiksi siltojen ja alikulkujen epätarkkana mallinnuksena. Taiteviivoilla voidaan mallintaa tarkasti esimerkiksi katujen reunat ja alikulkujen rakenteet.

#### **5.4 Havaintoja valmiista semanttisesta kaupunkitietomallista**

Koko Helsingin kattavasta CityGML-kaupunkitietomallista on olemassa sekä katselu-, kysely- että latauspalvelut. Kaikki kaupunkitietomallin palvelut löytyvät samalta alustalta, joka toimii internet-selaimella. Kaupunkitietomalliaineisto on avointa dataa lisenssillä Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen (CC BY 4.0). (HRI, 2017.)

Semanttinen CityGML-kaupunkitietomalli sisältää koko Helsingin alueella sijaitsevat rakennukset CityGML-muodossa ja maanpintamallin. CityGML-rakennukset ovat geometria- ja tietomallinnettu kunnalta jo löytyvien kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistojen sekä erikseen kerättyjen laserkeilaus- ja ilmavalokuva-aineistojen avulla. CityGML-tietomalli tarjoaa hyvän alustan jatkossa mallinnettaville kohteille, kuten kasvillisuuskohteille, maankäyttöalueille ja silloille. Kuvissa 50 ja 51 esitetään näkymä semanttisesta CityGML-kaupunkitietomallista. Kuvissa nähdään kaupunkitietomallin sisältämiä teksturoituja LoD2-tasoisia CityGML-rakennuksia sekä maanpintamallia.





**Kuva 50** Näkymä semanttisesta CityGML-kaupunkitietomallista. (Helsingin kaupunki)

Kuvan 50 näkymä semanttisesta kaupunkitietomallista on otettu suunnilleen samasta suunnasta kuin geometrisesta kaupunkimallista otettu näkymä kuvassa 32. Sekä visuaalisia että geometrisia eroavaisuuksia löytyy näiden kahden kaupunkimallin välillä, mutta suurin ja merkittävin eriytyminen on tekijä geometrisen kaupunkimallin ja semanttisen tietomallin välillä on semantiikan puuttuminen geometrisesta mallista.

Semanttisen CityGML-kaupunkitietomallin rakennus ja sen eri osat, kuten maapohja, katto ja seinän ulkopinnat, ovat spatio-semanttisesti koherensseja, minkä perusteella tiedetään CityGML-rakennuksen ja sen eri osien semanttisten ja geometrinen ominaisuuksien väliset yhteydet. CityGML-kohteiden geometriset kohteet tietävät, mitä ne ovat, ja semanttiset ominaisuudet tietävät, missä ne sijaitsevat ja mikä on niiden spatiaalinen ulottuvuus. Semanttisella kaupunkitietomallilla pystytään suorittamaan kehittyneitä kaupunkianalyyskejä ja -simulaatioita.



**Kuva 51** Näkymä CityGML-kaupunkitietomallin teksturoiduista LoD2-tasoisista rakennuksista ja maanpintamallista. (Helsingin kaupunki)

Kuvassa 52 esitetään LoD2-tasoiset CityGML-rakennukset ilman tekstuuria. Kuva havainnollistaa LoD2-tasoisien CityGML-rakennusten monimuotoisia kattomuotoja. Kuvassa 53 havaitaan kaupunkitietomallissa olevat LoD1-tasoiset CityGML-rakennukset ilman tekstuuria, koska LoD1-tasoiset rakennukset eivät sisällä ollenkaan tekstuuria. Kuvassa esitetään LoD1-tarkkuustasolla mallinnetut CityGML-rakennukset, mikä havaitaan rakennusten tasakatoista.



**Kuva 52** Näkymä CityGML-kaupunkitietomallin LoD2-tasoisista rakennuksista ilman tekstuuria. (Helsingin kaupunki)





**Kuva 53** Näkymä kaupunkitietomallin LoD1-tasoisista rakennuksista. (Helsingin kaupunki)

Kuva 54 havainnollistaa kaupunkitietomallissa esiintyviä eroavaisuuksia verrattuna reaali-maailmaan. Kuvan vasemmassa yläkulmassa rautatie kulkee todellisuudessa sillalla, joka on kuvautunut samaan korkeustasoon kuin alla kulkeva katutaso eli maanpinta. Maastomallin tuotannossa ei ole otettu huomioon esimerkiksi siltoja tai tunneleita, jolloin kyseiset kohteet kuvautuvat havainnollistetulla tavalla maanpinnan tasolle.



**Kuva 54** 3D-kaupunkitietomallista löytyvät CityGML-muotoiset rakennukset maanpintamallin päällä. (Helsingin kaupunki)

Maastomallia tulisi korjata siltojen osalta, ja lisäksi sillat tulisi mallintaa CityGML-kohteiksi. Sillat tulisi tuoda kaupunkitietomalliin omina kohteina, jolloin nämä poikkeamat eivät

enää erottuisi yhtä hyvin mallista. Kuvasta havaitaan myös maanpintamallilla olevan tekstuurin käytön ongelmakohta. Ortokuvan käyttäminen tosiortokuvan sijaan tuottaa pienehköä virhettä, joka näkyy rakennusten kivijalan alta pilkistävänä rakennuksen katon tekstuurina. Tosiortokuvan käyttäminen poistaisi kyseisen eroavaisuuden mallin ja reaaliympäristön välillä.

## **5.5 CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojektin arviointi**

CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojekti on ennen kaikkea monivaiheinen. Onnistuneen kaupunkitietomallin toteutumisesta on kuitenkin ehdotonta nähdä tuotantoprojekti yhtenä kokonaisuutena. Tuotantoprojekti koostuu useista työvaiheista, joiden vaatimukset tulee ymmärtää sekä yksittäisten työvaiheiden että koko projektin osalta. CityGML-tietomallin tuottaminen vaatii perehtyneisyyttä muun muassa kaupunkitietomallinnukseen yleisesti, useisiin sovelluksiin, kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistoihin sekä CityGML-standardiin ja sen mukaan tietomallinnettavien kaupunkimallikohteiden määrittäisiin ja sääntöihin.

Tuotantoprojekti alkaa erikseen hankittavien aineistojen keruulla, jossa hankitaan ilmavalokuva- ja laserkeilausaineisto koko mallinnettavalta alueelta. Ilmavalokuvien ja laserkeilausaineiston hankinta vie tyypillisesti melko runsaasti sekä aikaa että rahaa. Periaatteessa laserkeilaukselle ja sillä kerätylle pistepilviaineistolle kolmiulotteinen kaupunkimallinnus ei tuo erityisvaatimuksia. Kunnalla jo olemassa olevia ajantasaisia pistepilviaineistoja voi käyttää kaupungin kolmiulotteisessa mallintamisessa. Koko kaupungin kattavia viistokuvia sen sijaan ei varmaan monellakaan kunnalla ole valmiina, mutta teksturoimattomia malleja voi tuottaa ilman niitäkin. Kaupunkimallin tekstuurilla ei ole merkitystä tietomallista saataviin hyötyihin. Teksturoimattomasta tietomallista saadaan kaikki samat hyödyt kuin teksturoidustakin.

Aineiston esikäsittely sisältää useita työvaiheita, jotka liittyvät 3D-mallinnuksessa käytettävien lähtötietoaineistojen käsittelyyn. Koska CityGML-tietomalli perustuu pitkälti kunnalla jo olemassa oleviin kartta-, rekisteri- ja paikkatietoaineistoihin, vaikuttaa näiden aineistojen laatu työmääriin aineiston esikäsittelyssä. Lisäksi kyseisen työvaiheen toteutus vaikuttaa osaltaan lopputuloksen laatuun. Laadukas lähtötietoaineistojen esikäsittely vähentää virheiden määrää seuraavissa työvaiheissa. Aineiston esikäsittelyn kriittisin haaste on tekninen osaaminen, mutta myös työvoimaa vaaditaan.

CityGML-kaupunkitietomallin tuottaminen vaatii kokonais kuvan ymmärtämistä, koska tuotantoprojekti käsittää useita työvaiheita. Osa työvaiheista on luontevampaa ulkoistaa ulkopuoliselle taholle kuin suorittaa itse. On järkevää tarkastella, mitä osaamista löytyy käytettävissä olevilta henkilöresursseilta ja kuinka paljon on aikaa työvaiheiden suorittamiseen. Helsingin CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojektin ulkoistetut työt pitivät sisällään ennen kaikkea työsuorituksia, joissa vaadittiin erityisosaamista ja tiettyjen puoliautomaattisten sovellusten käyttämistä, joiden operointi itse ei olisi ollut kustannustehokasta. Ulkoistettujen töiden suorittaminen olisi ollut erittäin hankalaa Helsingiltä itseltään, jolloin kannattavampaa on antaa työsuoritusten teko osaavalle taholle. Näiden osaavien tahojen löytäminen voi kuitenkin olla hyvin haasteellista, mikä voi olla kohtalokasta CityGML-kaupunkitietomallin onnistuneessa ja hallitussa tuotannossa.

## 6 Johtopäätökset

Perinteisen kaksiulotteisen paikkatiedon käyttäminen kaupunkisuunnittelussa ja -kehityksessä ei tulevaisuudessa riitä, koska kaupungit ovat monimuotoisia ja kaupunkien kompleksisuus kasvaa entisestään. Kaupungistuminen johtaa väistämättä kaupunkien kasvuun, johon pitäisi vastata yhä paremmalla kaupunkien suunnittelulla, ylläpidolla, hallinnalla ja kehityksellä. Kaksiulotteisen informaation laajentaminen kolmanteen ulottuvuuteen sekä informaation rikastuttaminen semanttisella sisällöllä mahdollistavat innovatiivisen kaupunkisuunnittelun, jossa myös tulevaisuuden uudenaikaiset työ- ja toimintatavat tulevat olemaan avainasemassa.

Kaupunkia mallintavia kolmiulotteisia malleja pystytään käyttämään kaupunkien parempaan kehittämiseen ja suunnitteluun. Automaattiset tai puoliautomaattiset mallinnusmenetelmät ovat manuaalisia menetelmiä kustannustehokkaampia, minkä perusteella koko kaupungin laajuisen kolmiulotteisen mallintamisen tulee perustua pitkälti automaattisiin menetelmiin. Fotogrammetriset menetelmät ja laserkeilaustekniikka ovat suuressa määrin automatisoituja menetelmiä 3D-kaupunkimallin tuotannossa. Toteuttamiskelpoisia 3D-kaupunkimalleja ovat kolmioverkkomalli, värjätty pistepilvi ja CityGML-kaupunkitietomalli. Nämä 3D-kaupunkimallivaihtoehdot ovat toteutettavissa kustannustehokkaasti niistä saataviin hyötyihin nähden.

Lähitulevaisuudessa kaupunkimallin toteutuksessa eri mallinnusmenetelmien yhdistely tulee olemaan merkittävää. Fotogrammetrisen mallin heikkoudet ovat kompensoitavissa käyttämällä laserkeilausaineistoa yhdessä valokuvien kanssa. Fotogrammetrisessä kaupunkimallinnuksessa suurin hyöty saataisiin yhdistelemällä nimenomaan maanpinnalla suoritettua mobiilikeilausta ja ilmavalokuvausta.

Kaupunkia voidaan mallintaa eri tekniikoilla, joiden sopivuutta toivottuihin tavoitteisiin tulee tutkia ennen kaupunkimallin toteuttamiseen ryhtymistä. Kolmiulotteisella kaupunkimallilla pyritään vastaamaan tiettyihin ennalta määritettyihin käyttötarkoituksiin, joita varten kaupunki tullaan mallintamaan tietyllä halutulla tarkkuustasolla. Kaupunkimallinnustyön budjetti toki määrittelee pitkälti toteuttamiskelpoiset mallit, mutta myös henkilöstön tietotaito ja tekninen osaaminen ovat merkittäviä tekijöitä kaupunkimallin sujuvassa ja onnistuneessa tuotannossa.

Siinä missä rakennusten tietomallinnus ja uusien digitaalisten ympäristöjen tuominen rakennuslalle ovat voineet synnyttää joko avoimia standardeja, suljettuja yritysten omia standardeja, useita erilaisia standardeja tai ei yhtäkään standardia, kaupunkien tietomallinnus on voinut synnyttää useita sekä avoimia että suljettuja standardeja. Onneksi näin ei kuitenkaan ole käynyt, vaan on suuri etu, että kaupunkitietomallinnukseen on kehitetty kansainvälinen tietomallistandardi CityGML, jonka periaatteiden ja määritelmien mukaan kaupunkitietomalli voidaan toteuttaa.

Nykyään vaaditaan entistä tasalaatuisempaa ja yhtenäisempää informaatiota, jotta suuret tietoineistot pystytään valjastamaan monenlaisiin analyyseihin ja sovelluksiin. Nykypäivänä perusoletuksena on, että aineistojen tulisi olla yhteentoimivia muiden aineistojen kanssa, mihin on kehitetty kaupunkimallikohteiden standardisoinnista vastaava CityGML. Nämä

vaatimukset ovat erittäin tärkeitä senkin vuoksi, että sillä mahdollistetaan aineistojen käyttö eri aloilla ja sovelluksilla.

CityGML-standardi on mahdollistanut useiden kaupunkien 3D-tietomallinnuksen. CityGML-mallin kehitystyö on tärkeää, mutta jo nyt standardi on riittävän kattava ja yksiselitteinen kaupunkimallille tärkeimpien kohteiden kolmiulotteiseen tietomallinnukseen. Kaupunkimallille merkittävimpiä kohteita ovat rakennukset, joiden mallintaminen CityGML-muodossa riittää hyvin aluksi ainoaksi CityGML-kaupunkitietomallikohteeksi. CityGML-rakennusten tuottamisen jälkeen voidaan pääasiassa keskittyä jo kaupunkitietomallin käyttämiseen sekä tutkia mahdollisuutta uusien kaupunkimallikohteiden lisäämisestä kaupunkitietomalliin. CityGML-kaupunkitietomalli liittyy laajempaan kokonaisuuteen osana muun muassa kaupunkikehitystä, digitalisaatiota, digitaalista replikaa kaupungista ja älykästä kaupunkia. Nykyään tietomalleja ei käytetä vain siihen, että asioita tehdään paremmin, vaan tehdään parempia asioita.

Fotogrammetrinen kaupunkimallinnus on erittäin vartenotettava vaihtoehto kaupunkien nopeaan ja fotorealistiseen kolmiulotteiseen mallinnukseen. Fotorealistisen kolmioverkkomallin tuottaminen onnistuu nykypäivänä lähes automaattisesti 3D-mallinnussovelluksilla. Kolmioverkkomalli toimii hyvänä lähtökohtana kaupunkien kolmiulotteisessa mallinnuksessa, koska kolmioverkkomalli pystytään tuottamaan melko nopeasti ja vaivattomasti. Fotogrammetrisessä mallinnuksessa tärkeintä ovat lukuisat hyvälaatuiset valokuvat mallinnettavasta kohteesta, minkä huomioiminen lähes riittää fotorealistisen mallin tuottamiseen.

Kaupungit ovat kooltaan ja rakenteeltaan toisistaan poikkeavia, sekä kaupunkien käyttötarkoitukset kaupunkimalleille voivat olla erilaisia tai kaupungit voivat olla epätietoisia kaupunkimallien käyttötavoista. Näistä syistä kaupungin ensimmäisen kolmiulotteisen kaupunkimallin tulisi olla kolmioverkkomalli. Kolmioverkkomalli on suositeltava vaihtoehto kaupungin ensimmäiseksi kolmiulotteiseksi kaupunkimalliksi, koska sen tuottaminen onnistuu melko vähäisellä työmäärällä siitä saataviin monipuolisiin hyötyihin nähden.

CityGML-kaupunkitietomallin onnistunut toteuttaminen vaatii laaja-alaista ymmärrystä kaupunkitietomallista kokonaisuutena, mutta myös kaupunkitietomallityön eri osavaiheiden vaatimukset tulee ottaa huomioon ennen kaupunkitietomallityön aloittamista. CityGML-kaupunkitietomallin tuottaminen sisältää enemmän riskitekijöitä kuin kolmioverkkomallin tuottaminen, minkä vuoksi kolmioverkkomallin tuottaminen ensimmäiseksi kaupungin kolmiulotteiseksi malliksi on järkevämpää. Lisäksi tietomallin teko ei ole yhtä suoraviivaista tai helppoa kuin kolmioverkkomallin. CityGML-kaupunkitietomallin onnistunut toteuttaminen edellyttää huomattavaa sitoutumista tietomallityöhön.

Kaupunkitietomallin kohteista on saatavilla sekä semanttista, geometrista että graafista sisältöä ja ominaisuustietoja kohteisiin linkitettyjen tai lisättyjen tietojen puitteissa. CityGML-standardin mukaisesti tietomallinnettujen kohteiden semanttisten esitysten korkea laatu yhdistettynä kohteiden eheisiin geometrioihin ja topologioihin mahdollistavat lukemattomia käyttökohteita ja mahdollisuuksia kaupunkitietomallille. Tietomallikohteiden tarjoama monipuolinen informaatio mahdollistaa kehittyneiden kaupunkianalyysien ja -simulaatioiden suorittamisen, mikä on tulevaisuuden kaupungistumisen kehityskulkua ajatellen erittäin tärkeää.

Fotorealistinen kolmioverkkomalli on geometrinen kaupunkimalli, joka sisältää sekä geometrista että visuaalista informaatiota. Malli esittää erityisen tarkkaa toisintoa reaali maailmasta, koska kolmioverkkomallista löytyvät kaikki kuvaushetkellä paikallaan pysyneet kohteet. Kolmioverkkomallia voidaan hyödyntää muun muassa silloin, kun on tarve visualisoida kohdetta tai tuottaa pohjamalli kohteen suunnitteluprosessiin. Kolmioverkkomallin tehokas käyttö voi perustua muiden kartta- ja paikkatietoaineistojen yhteiskäyttöön, minkä seurauksena kolmioverkkomalli on parhaassa mahdollisessa tapauksessa hyvin toimiva hybridi-malli.

Kaupunkimalleilla on lukuisia erilaisia käyttötapoja, joista vain murto-osaa havainnollistetaan liitteessä 1 (Helsingin kaupunki, 2017). Helsingin kaupunkimalleilla on ollut jo muutamia konkreettisia käyttötapoja alkuvuoteen 2017 mennessä, ja tätä jo toteutunutta kaupunkimallien hyötykäyttöä kuvataan violetilla värillä. Niin geometrisilla kuin semanttisilla kolmiulotteisilla kaupunkimalleilla on hyvin suuri määrä erityyppisiä käyttökohteita ja sovelluksia.

Käyttöasteesta huomataan, että molempia kaupunkimalleja on hyödynnetty jossain määrin kaikissa muissa hyötykohteissa paitsi osa-alueella: omaisuudenhallinta, poikkeustilanteet, pelastustoimi ja turvallisuus sekä ylläpitotoimi. Tämä osa-alue voisi olla seuraava kaupunkimallien hyötykäytön kohde. Alkuvuoden 2017 jälkeen Helsingin kaupunkimalleista kolmioverkkomallia on hyödynnetty myös omaisuudenhallinnan parissa, kun vakuutusyhtiöt ovat käyttäneet kolmioverkkomallia kiinteistöillä olevien rakennusten massojen laskennassa ja siten vakuutusten määrittämisessä. Kaupunkimallien korkein käyttöaste on osa-alueella: palvelukehitys ja toimintatavat, elinkeinoelämä, innovointi ja tuotekehitys, opetus ja tutkimus. Tämän osa-alueen käyttöasteen suuruus johtuu ylipäättään kaupunkimallien tuomasta uutuusarvosta ja mallien mahdollistavista innovatiivisista toiminta- ja työtapoista.

Liitteen 1 käyttötapojen luettelo hyötykäytön kohteiden ja sovellusten suhteen ei kuitenkaan ole kattava, vaan käyttötarkoituksia voi olla lähes rajattomasti. Molemmat Helsingin kaupunkimallit ovat avointa dataa eli vapaasti kenen tahansa käytettävissä. Avoimena datana jaettavat kaupunkimallit voivat tuottaa niin julkisella kuin yksityisellä sektorilla mullistavia tuote- ja palveluinnovaatioita. Zhu et al. (2015) luettelee avoimen datan käytöstä saatavia hyötyjä, joita ovat muun muassa taloudelliset hyödyt, aineiston käytön maksimointi, tutkimushankkeiden motivointi, kehittäjien välisen yhteistyön edistäminen ja saavutusten maksimointi. Tulevaisuuden liiketoimintapotentiaali voi löytyä avoimena datana jaettavista kaupunkimalliaineistoista.



## 7 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli selvittää, millä eri tavoilla kaupunkia pystytään mallintamaan kolmiulotteisesti ja mihin kaupunkimalleja tarvitaan. Työssä esiteltiin kahden kaupunkimallin tuotantoprojektit, mitä työvaiheita toteutus sisälsi ja dokumentoitiin projekteissa opitut asiat. Tuotantoprojektien arvioinnin kautta pyrittiin löytämään suositeltava kaupunkimalli ensimmäiseksi kaupungin kolmiulotteiseksi malliksi.

Kirjallisuustutkimuksen kautta havaittiin, että kaupunkimalli pystytään tuottamaan useilla erilaisilla ratkaisulla. Kaupunkimallin toteuttamiseen on tarjolla niin manuaalisia, puoliautomaattisia kuin automaattisia menetelmiä, joista kustannustehokkaita vaihtoehtoja ovat automaattiset ja puoliautomaattiset menetelmät. Kaupunkimallivaihtoehdot voidaan ensinnäkin jakaa semanttisiin ja geometrisiin kaupunkimalleihin, jotka voidaan vielä jaotella lähes automaattisesti toteutettaviin malleihin tai manuaalista työtä vaativiin malleihin.

Kaupunkimalleilla on lukemattomia käyttökohteita ja -tapoja, joita voidaan hyödyntää useilla erilaisilla sovellusalueilla ja toimialoilla. Kolmiulotteiset kaupunkitietomallit kuuluvat laajempaan kaupunkikehityksen ja digitalisoinnin kontekstiin, jossa on kyse kaupungin digitaalisista kaksosista ja älykkäistä kaupungeista.

Sekä kirjallisuustutkimuksen että käytännön osuuden kautta selvisi, että kaupunkimallin tuottaminen tulee olla kustannustehokasta mallista saataviin hyötyihin nähden. Tästä syystä toteuttamiskelpoisia kaupunkimalleja ovat automaattisilla tai puoliautomaattisilla menetelmillä tuotettavat värjätyt pistepilvet, kolmioverkkomallit ja CityGML-kaupunkitietomallit.

Työn käytännön osuudessa tarkasteltiin sekä fotorealistisen kolmioverkkomallin että semanttisen CityGML-kaupunkitietomallin tuotantoprojekteja, joiden monivaiheiset prosessit on jaettu osavaiheisiin. Työhön dokumentoitu kokemus kaupunkimallien erityisesti teknisestä tuotannosta auttaa purkamaan monivaiheisen kaupunkimallityön osaprosesseihin.

Kaupunkimallien tuotantoprojektien tarkastelujen perusteella havaittiin, että geometrinen kaupunkimalli on huomattavasti yksinkertaisempi ja suoraviivaisempi toteuttaa kuin semanttinen kaupunkitietomalli. Semanttisen CityGML-kaupunkitietomallin toteuttaminen vaatii sekä laaja-alaista tietotaitoa kaupunkitietomallityöstä että useiden osavaiheiden vaatimusten ymmärtämistä. Geometrisista kaupunkimalleista kolmioverkkomalli pystytään tuottamaan sujuvasti puoliautomaattisilla mallinnusmenetelmillä. Fotorealistinen kolmioverkkomalli on sopiva kaupunkimalli kaupungin ensimmäiseksi kolmiulotteiseksi malliksi, joka tarjoaa monipuolisia käyttömahdollisuuksia.

## Lähdeluettelo

3D City Database. 2017. The CityGML Database – New Release 3.3. [Viitattu 14.5.2017]. Saatavissa:

[http://www.3dcitydb.org/3dcitydb/fileadmin/downloaddata/EN\\_3DCityDB\\_Flyer\\_DinA4\\_web.pdf](http://www.3dcitydb.org/3dcitydb/fileadmin/downloaddata/EN_3DCityDB_Flyer_DinA4_web.pdf).

Altmann, Y. & Maccarone, A. & McCarthy, A. & Buller, G. S. & McLaughlin, S. 2016. Joint spectral clustering and range estimation for 3D scene reconstruction using multispectral lidar waveforms. Teoksessa: IEEE. 24th European Signal Processing Conference 2016. Budapest, Unkari. 29.8.-2.9.2016. S. 513-517. ISSN 2076-1465. DOI:10.1109/EUSIPCO.2016.7760301.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). 2013. LAS Specification Version 1.4 – R13. [Viitattu 17.4.2017]. Saatavissa: [http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS\\_1\\_4\\_r13.pdf](http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf).

Bentley Systems. 2017. Going Digital: Bentley Systems Advances Reality Modeling to Extend the Scope of Engineering and Surveying Value. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 19.4.2017]. Saatavissa: <https://www.bentley.com/en/about-us/news/2017/april/05/going-digital>.

Bentley Systems. 2016. ContextCapture – User Guide. 239 s.

Biljecki, F. & Stoter, J. & Ledoux, H. & Zlatanova, S. & Çöltekin, A. 2015. Applications of 3D City Models: State of the Art Review. ISPRS International Journal of Geo-Information. [Verkkojulkaisu]. Vol. 4. S. 2842-2889. ISSN 2220-9964. DOI:10.3390/ijgi4042842.

BuildingSMART Finland. 2015. Yleiset inframallivaatimukset (YIV2015) – Osa 2: Yleiset mallinnusvaatimukset. [Viitattu 16.4.2017]. Saatavissa: [http://infrabim.fi/yiv-2015/YIV2015\\_Mallinnusohjeet\\_OSA2\\_Yleiset\\_Vaatimukset\\_V\\_1\\_0.pdf](http://infrabim.fi/yiv-2015/YIV2015_Mallinnusohjeet_OSA2_Yleiset_Vaatimukset_V_1_0.pdf).

CEN CENELEC. 2015. Smart and Sustainable Cities and Communities Coordination Group – Final Report. CEN-CENELEC-ETSI Sector Forum on Smart and Sustainable Cities and Communities (SF-SSCC). [Viitattu 9.4.2017]. Saatavissa: [ftp://ftp.cencenelec.eu/EN/EuropeanStandardization/Fields/SmartLiving/City/SSCC-CG\\_Final\\_Report-recommendations\\_Jan\\_2015.pdf](ftp://ftp.cencenelec.eu/EN/EuropeanStandardization/Fields/SmartLiving/City/SSCC-CG_Final_Report-recommendations_Jan_2015.pdf).

Cohen, B. 2015. Smart City Wheel. New life for ageing cities. Proceedings of the Conference of the Urban Systems and Environment Joint Research Centre (USE). ISBN 978-94-6186-572-4.

Döllner, J. & Kolbe, T. H. & Liecke, F. & Sgouros, T. & Teichmann, K. 2006. The virtual 3D city model of Berlin - Managing, integrating and communicating complex urban information. Proceedings of the 25th International Symposium on Urban Data Management. Aalborg, Tanska. 15-17.5.2006. [Viitattu 11.1.2017]. Saatavissa: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1145759/file.pdf>.

Döllner, J. & Buchholz, H. 2005. Expressive Virtual 3D City Models. Proceedings of the 22nd International Cartographic Conference. A Coruña, Espanja. 11.-16.7.2005. [Viitattu 23.1.2017]. Saatavissa: <http://www.cartesia.org/geodoc/icc2005/pdf/oral/TEMA15/Session%209/JUERGEN%20D OELLNER.pdf>.

Erving, A. 2008. Paikkatiedoista kaupunkimalleihin: CityGML selvitystyö. Teknillinen korkeakoulu, fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. Espoo. 41 s.

Finnish Geospatial Research Institute (FGI). Korkeusmallit. [Viitattu 19.1.2017]. Saatavissa: <http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/korkeusmallit>.

Forlani, G. & Roncella, R. & Nardinocchi, C. 2015. Where is photogrammetry heading to? State of the art and trends. Conference on Geodesy and Geomatics. Rooma, Italia. 3.6.2014. Rendiconti Lincei. Vol. 26:1. S. 85-96. ISSN 1720-0776. DOI:10.1007/s12210-015-0381-x.

Gartner. 2016. Gartner's Top 10 Strategic Technology Trends for 2017. [Viitattu 16.3.2017]. Saatavissa: <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>.

Geospatial Media and Communications. 2017. Global Geospatial Industry Outlook. [Raportti].

Hebel, M. & Arens, M & Stilla, U. 2009. Utilization of 3d city models and airborne laser scanning for terrain-based navigation of helicopters and UAVs. Teoksessa: Stilla, U. & Rotensteiner, F. & Paparoditis, N. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Pariisi, Ranska. 3.-4.9.2009. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVIII. Part 3/W4. S. 187-192. ISSN 2194-9034. [Viitattu 17.1.2017]. Saatavissa: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/3-W4/pub/CMRT09\\_187.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/3-W4/pub/CMRT09_187.pdf).

Helsingin kaupunki. 3D-tietomallipalvelu avoimena datana. [Kaupunkitietomallialusta]. [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: <http://kartta.hel.fi/3d/>.

Helsingin kaupunki. 2017. A New Generation of City Models. Hel<3Dev: Helsingin 3D-kaupunkimallit käyttöön! [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: [http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/data/dokumentit/HelLovesDev/Helsingin\\_3D-malli\\_Hel\\_Dev\\_09022017.pdf](http://www.hel.fi/hel2/tietokeskus/data/dokumentit/HelLovesDev/Helsingin_3D-malli_Hel_Dev_09022017.pdf).

Helsingin kaupunki. 2016. Uuden sukupolven 3D-kaupunkimallit Helsinkiin! [Viitattu 14.1.2017]. Saatavissa: <http://www.hel.fi/static/liitteet/kanslia/hki3d/Uuden%20sukupolven%20kaupunkimallit%20Helsinkiin.pdf>.

Helsinki Region Infoshare (HRI). 2017. Helsingin 3D-kaupunkimallit. [Viitattu 14.5.2017]. Saatavissa: <http://www.hri.fi/fi/dataset/helsingin-3d-kaupunkimalli>.

Hirschmüller, H. 2007. Stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 30:2. S. 328-341. ISSN 0162-8828. DOI:10.1109/TPAMI.2007.1166.

Hirschmüller, H. 2005. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. Teoksessa: Schmid, C. & Soatto, S. & Tomasi, C. *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, Kalifornia, Yhdysvallat. 20-25.6.2005. Los Alamitos, Kalifornia, USA: IEEE Computer Society. Vol. II. S. 807-814. ISSN 1063-6919. DOI:10.1109/CVPR.2005.56.

Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta (JUHTA). 2014. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Versio: 1.0. [Viitattu 2.2.2017]. Saatavissa: <http://www.jhs-suositukset.fi/suomi/jhs185>.

Kairos Future & WSP. 2011. Ten truths about BIM. [Raportti].

Kolbe, T. H. 2009. Representing and exchanging 3D city models with CityGML. *3D Geo-Information Sciences*. Berliini, Saksa: Springer Berlin Heidelberg. S. 15-31. DOI:10.1007/978-3-540-87395-2\_2. ISBN 978-3-540-87395-2.

Leberl, F. & Meixner, P. & Wendel, A. & Irschara, A. 2012. Automated photogrammetry for three-dimensional models of urban spaces. *Optical Engineering*. [Verkkojulkaisu]. Vol. 51:2. [Viitattu 9.1.2017]. DOI:10.1117/1.OE.51.2.021117. ISSN 0091-3286.

Liang, J. & Shen, S. & Gong, J. & Liu, J. & Zhang, J. 2016. Embedding user-generated content into oblique airborne photogrammetry-based 3D city model. *International Journal of Geographical Information Science*. [Verkkojulkaisu]. Vol. 31:1. S. 1-16. [Viitattu 19.1.2017]. DOI:10.1080/13658816.2016.1180389. ISSN 1365-8816.

Lingli, Z. 2015. A pipeline of 3d scene reconstruction from point clouds. Väitöskirja. Insinööritieteiden korkeakoulu, maankäyttötieteiden laitos. Espoo. 206 s. ISBN 978-951-48-0247-8.

Liping, S. & Wang, L. 2015. Oblique photogrammetry-based 3D GIS technology. *Geomatics Indaba 2015 – Proceedings Day 2*. Johannesburg, Etelä-Afrikka. 11.-13.8.2015. [Viitattu 23.1.2017]. Saatavissa: <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2015/08/Liping-Sun-and-Lei-Wang.pdf>.

Liu, J. & Guo, B. 2014. Reconstruction and simplification of urban scene models based on oblique images. Teoksessa: Schindler, K. & Paparoditis, N. *ISPRS Technical Commission III Symposium*. Zürich, Sveitsi. 5.-7.9.2014. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-3. S. 197-204. ISSN 2194-9034. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-3-197-2014.

Loikkanen, H. A. & Laakso, S. 2016. Tiivistetty kaupunkikehitys: tuottavuuden ja hyvinvoinnin kasvun perusta. Helsinki: Tehokkaan Tuotannon Tutkimussäätiö. 91 s. ISBN 978-952-67583-7-4.

Maanmittauslaitos (MML). 2016. Laserkeilain reppuun ja menoksi. Maanmittauslaitoksen asiakaslehti Tietoa Maasta. [Verkkojulkaisu]. Vol. 3. S. 6-7. [Viitattu 19.1.2017]. Saatavissa: [http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/tiedostolataukset/tm\\_3-2016.pdf](http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/tiedostolataukset/tm_3-2016.pdf). ISSN 2242-0002.

Open Geospatial Consortium (OGC). 2015. OGC Smart Cities Spatial Information Framework. [Viitattu 16.2.2017]. Saatavissa: <https://portal.opengeospatial.org/files/61188>.

Open Geospatial Consortium (OGC). 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Versio: 2.0.0. 344 s. [Viitattu 19.1.2017]. Saatavissa: <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>.

Remondino, F. & Toschi, I. & Gerke, M. & Nex, F. & Holland, D. & McGill, A. & Talaya Lopez, J. & Magarinos, A. 2016. Oblique aerial imagery for NMA – Some best practices. XXIII ISPRS Congress. Praha, Tšekki. 12.-19.7.2016. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XLI-B4. S. 639-645. ISSN 2194-9034. DOI:10.5194/isprs-archives-XLI-B4-639-2016.

Rönnholm, P. 2017. Visual SFM, semi-global matching. Course: GIS-E3040 Advanced Photogrammetry, lecture 4. Espoo. 2.3.2017.

Rönnholm, P. & Haggrén, H. 2005. Luento 5: Kuvakoordinaattien laskeminen ja eteenpäinleikkaus. [Viitattu 19.1.2017]. Saatavissa: [http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/301\\_5\\_2005.pdf](http://foto.hut.fi/opetus/301/luennot/301_5_2005.pdf).

Singh, S. P. & Jain, K. & Mandla, V. R. 2014. Image based 3D city modeling: Comparative study. Teoksessa: Remondino, F. & Menna, F. ISPRS Technical Commission V Symposium. Riva del Garda, Italia. 23.-25.6.2014. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XL-5. S. 537-546. ISSN 2194-9034. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-5-537-2014.

Singh, S. P. & Jain, K. & Mandla, V. R. 2013. Virtual 3D City Modeling: Technique and Applications. Teoksessa: Isikdag, U. ISPRS 8th 3D GeoInfo Conference & WG II/2 Workshop. Istanbul, Turkki. 27.-29.11.2013. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XL-2/W2. S. 73-91. ISSN 2194-9034. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-2-W2-73-2013.

Stadler, A. & Kolbe, T. H. 2007. Spatio-semantic Coherence in the Integration of 3D City Models. Teoksessa: Stein, A. 5th International symposium on Spatial Data Quality. Enschede, Hollanti. 13.-15.6.2007. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI-2/C43. ISSN 1682-1777.

Suomisto, J. 2016. Helsinki – 3D city models in use. INTERGEO – Conference and Trade Fair for Geodesy, Geoinformation and Land Management. [Konferenssiesitys]. Hampuri, Saksa. 12.10.2016.

Terrasolid. 2014. Advanced Mobile Coloring. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 15.2.2017]. Saatavissa: [http://www.terrasolid.com/download/presentations/2014/advanced\\_mobile\\_coloring.pdf](http://www.terrasolid.com/download/presentations/2014/advanced_mobile_coloring.pdf).

United Nations. 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights. New York, NY, USA: United Nations. ISBN 978-92-1-151517-6.

Valovirta, V. & Nieminen, M. & Pelkonen, A. & Turkama, P. & Heikura, T. & Lindman, J. & Inkinen, S. & Jari Kaivo-oja, J. 2011. Systeemisen muutoksen haasteet ja innovaatiotoiminnan mahdollisuudet – Tapaustutkimuksia ja politiikkanäkökulmia. Tekesin katsaus 286/2011. Helsinki: Tekes. ISSN 1797-7339.

Vexcel Imaging. 2016. UltraCam Osprey Mark3 Premium – Technical Specs. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 2.2.2017]. Saatavissa: <http://www.vexcel-imaging.com/products/ultracam-osprey-m3-premium/ultracam-osprey-m3-premium-technical-specs/>.

Virtanen, J. & Hyypä, H. & Ahlavo, M. & Markkula, M. & Miikki, L. & Hyypä, J. & Kurkela, M. & Launonen, P. & Hollström, T. 2014. Monialaisesti ratkaisuja kaupungistumiseen – Energizing Urban Ecosystems. Teoksessa: Yhteistä tulevaisuutta rakentamassa ja kartoittamassa. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Helsinki: Libris. ISBN 978-952-6690-52-0.

virtualcitySYSTEMS. 2017a. CityGML based solutions for digital cities. [Kuva]. [Viitattu 16.1.2017]. Saatavissa: <http://www.virtualcitysystems.de/en/solutions#citygml>.

virtualcitySYSTEMS. 2017b. Create semantic CityGML based 3d city models - BuildingReconstruction. [Kuva]. [Viitattu 5.5.2017]. Saatavissa: <http://www.virtualcitysystems.de/en/products/buildingreconstruction>.

WSP. 2013. What is BIM? [Viitattu 9.1.2016]. Saatavissa: <http://www.wsp-pb.com/en/Who-we-are/In-the-media/News/2013/What-is-BIM/>.

Zhu, L. & Lehtomäki, M. & Hyypä, J. & Puttonen, E. & Krooks, A. & Hyypä, H. 2015. Automated 3D scene reconstruction from open geospatial data sources: airborne laser scanning and a 2D topographic database. Remote Sensing. Vol. 7:6. S. 6710-6740. ISSN 2072-4292. DOI:10.3390/rs70606710.

## **Liiteluettelo**

**Liite 1** Helsingin kaupunkimallien käyttötavat ja käyttöaste tammikuuhun 2017 mennessä.  
(Helsingin kaupunki, 2017, mukailten)



**Liite 1** Helsingin kaupunkimallien käyttötavat ja käyttöaste tammikuuhun 2017 mennessä.  
(Helsingin kaupunki, 2017, mukaillen)

